

Luis Mariano
DEL RÍO PÉREZ
Universidad de Extremadura

Enrique
SERRANO CAÑADAS
Universidad de Valladolid

Paisajes en vías de extinción: Los glaciares en Picos de Europa y Pirineos



RESUMEN: Los glaciares de la Tierra forman extensos paisajes definidos por la presencia y extensión del hielo, pero en la Península Ibérica no pasan de ser pequeñas masas heladas heredadas de la Pequeña Edad del Hielo. Los glaciares, en retroceso desde hace más de un siglo, caracterizan porciones de los paisajes de alta montaña y son objeto de especial interés por su valor cultural, paisajístico y científico. El horror, primero, y la atracción, después, que los humanos han sentido ante ellos les dotan del valor cultural, en particular desde que el romanticismo cambia su percepción y son recorridos, estudiados, dibujados o descritos. Los paisajes glaciares de Pirineos y Picos de Europa desaparecen al ritmo del ascenso térmico que el Cambio Climático está ocasionando en toda la Tierra y hoy en los Pirineos quedan 21 glaciares y en los Picos de Europa 4 heleros. Su estudio se realiza mediante fuentes históricas, técnicas geofísicas y geomáticas que tratan de conocer la pérdida de espesor o de extensión con la mayor precisión posible.

PALABRAS CLAVE: Paisajes glaciares; Retroceso glaciario; Glaciaciones; Cultura glaciaria; Georradar; Picos de Europa; Pirineos.

LANDSCAPES TO EXTINCTION: GLACIERS OF THE PICOS DE EUROPA AND THE PYRENEES

ABSTRACT: Earth's glaciers shape widespread landscapes defined by the presence and extent of ice. In the Iberian Peninsula only there are small ice bodies left over from the Little Ice Age. Glaciers are moving back since a century ago, but they still characterize the high mountain landscapes and they have a particular interest for their cultural, scenic and scientific values. Humans have felt horror, first, and attraction, then, a changing perception since romanticism movement has travelled, studied, drawn or described glaciers. Pyrenees (21 glaciers) and Picos de Europa (4 ice patches) ice masses inevitably melt and the landscapes disappear by the thermal rise rate of Climate Change. The study of glaciers is made by historical sources, geophysical (radar ground penetration, electrical soundings) and geomatics techniques (Laser-Scanner, DGPS), trying surveys on the loss of thickness and extension as accurately as possible.

KEY WORDS: Glacial landscapes; Glacial melting; Glaciations; Glacier culture, GPR, Picos de Europa, Pyrenees.

«Los glaciares pirenaicos se retiran o mueren. Es una derrota del paisaje. Su pérdida no es sólo una advertencia climática o significa exclusivamente un cambio hidrológico, es sobre todo un paisaje que se va. Mientras los valles que tanto hemos querido se urbanizan, mientras cada vez más laderas sólo entendidas como esquiabiles se entregan a las muchedumbres, los glaciares solitarios en sus aposentos retirados mueren silenciosamente. En sus parajes hemos vivido buena parte de nuestros sueños, allí aprendimos un profundo sentido de la belleza. Ahora se van descarnando. Uno de los paisajes más solemnes de nuestras montañas era tan efímero como una escultura de hielo bajo el sol. Se retiran los genios y queda vacío el escenario. Tú, lector, reconocerás en él, en los cuencos de granito, caliza o esquistos, sus huellas y sus símbolos: piedras pulidas, estrias en las rocas, lagunas nuevas, amontonamientos de cantos que dibujan cuerpos de hielo desaparecidos, y en tu interior reaparecerán los viejos esplendores. El anciano Pirineo sigue resistiendo».

Eduardo Martínez de Pisón, 2006

INTRODUCCIÓN: LOS PAISAJES GLACIARES Y LA CRIOSFERA

La criosfera terrestre está compuesta por el hielo en la superficie terrestre, el hielo en el subsuelo, el hielo en los mares y la nieve, y se reparte por los lugares de la Tierra donde el frío es lo suficientemente intenso para que el agua esté en estado sólido. Está representada sobre todo en los ambientes polares, el Ártico y el Antártico, pero también en las montañas, donde se muestra como hielo en el suelo, permanente o estacional, hielo en la superficie, los glaciares y heleros, y el manto nival del invierno. Pero de los elementos de la criosfera los glaciares poseen el componente paisajístico más importante, que implica a los ambientes polares y las montañas templadas, tropicales y ecuatoriales.

Los glaciares son capaces de modelar grandes formas de la tierra y generar amplios paisajes. La diversidad de glaciares, de los amplios domos de hielo de la Antártica a los de una hectárea de las montañas, implica una muy variada presencia en el paisaje, pero cuando hay masas de hielo, existe un paisaje natural exclusivo y excepcional, el paisaje glaciar. Actualmente los glaciares ocupan un 10% de la superficie terrestre, 15 millones de km², y son herederos de una expansión reciente de los glaciares, acaecida entre el s. XIV y el XIX, y conocida como la Pequeña Edad del Hielo (PEH). Este periodo se caracterizó por el descenso de las temperaturas y por ser el último avance de los glaciares de la Tierra. A finales del s. XIX los glaciares ocupaban más que ahora, pero sólo algo más del 10% de la superficie terrestre, muy poco comparado con el 32% que representaron durante la última glaciación, hace en torno a 18.000 años.

Los glaciares acumulan el 75% del agua dulce de la superficie terrestre, y por ello son la reserva de uno de los recursos más importantes para la humanidad. Además, dirigen los ritmos hidrológicos en detalle y su influencia en las plantas, suelos, fauna y modos de vida determina que donde existen glaciares la ecología y la geografía se supedita a ellos. Por ello, su capacidad para generar paisajes, los grandes paisajes de la Tierra, y su incidencia en la vida animal y los modos de vida humanos hace que a sus propios valores glaciológicos (reservas de agua, transferencia de sedimentos, generación de formas de relieve) se sumen los derivados de su relación con la humanidad, configurando paisajes naturales con contenidos culturales excepcionales.

Distintas sociedades tradicionales conviven con el frío y con los glaciares, explotan sus recursos (agua, hielo) y los utilizan como vía de comunicación en las montañas, dejando un legado material asociado a sus modos de vida y aprovechamiento. Cabañas en altura, útiles para trabajar el hielo, para adaptar los animales a sus travesías por los glaciares o para combatir sus avances, desprendimientos o fusiones, son habituales en los Andes, el Himalaya, los Alpes, o en las culturas inuits del Ártico. La relación con los glaciares es antigua, como demostró el Hombre de Similaum, preparado para la caza y la travesía por las alturas hace 5.300 años, cuyo cadáver momificado fue descubierto en 1991 en el glaciar alpino del mismo nombre. Pero hasta que en el s. XVIII irrumpen nuevas mentalidades sobre la naturaleza se mantuvo una visión de horror y miedo hacia los glaciares y una relación distante, con una cultura material muy especializada pero escasa.

El redescubrimiento de la naturaleza y las montañas en el s.XVIII posibilita la atracción por los glaciares, que pasan de ser un lugar atroz y peligroso, a foco de atracción para naturalistas y artistas, buscando conocimiento, aventura, desafíos y experiencias. El movimiento romántico encuentra allí lo sublime y la belleza, dos de sus máximos ideales, y la cultura europea se vuelve hacia las montañas y hacia los glaciares. Los paisajes glaciares son descubiertos por la cultura primero y la técnica después, para constituir una parte esencial del bagaje cultural alpino y europeo. Las pinturas románticas y científicas, los libros también científicos, literarios o artísticos, las narraciones de naturalistas y alpinistas, forman parte de la cultura glaciar y no es posible mirar a los glaciares sin ese contenido cultural que trasciende su composición de agua helada, no sólo en los Alpes, sino también en los Andes, el Himalaya o, por supuesto, los Pirineos, donde los movimientos iniciados en los Alpes se expandieron rápidamente. Y tras su descubrimiento cultural, llegaría la técnica y su capacidad para convertir los glaciares en recursos, aportando agua para beber, para irrigar los campos de altura y los valles, lo que ya se hacía en el sistema tradicional, o para generar energía eléctrica. Pero además, son un recurso turístico al que acuden los montañeros, cuya cantidad es ya significativa para las economías locales, regionales e incluso en algunos países, nacionales, y los turistas, para ver glaciares como el Perito Moreno (Argentina), el Columbia (Canadá), La Mer de Glace (Alpes) o paisajes glaciares de Islandia, Spitsbergen o la Antártida.

Cultura y naturaleza se entremezclan en la conciencia social para el uso y disfrute de los glaciares y de sus paisajes como recursos éticos, estéticos y económicos en amplias porciones de la Tierra (Haeberli, 2007; Orlove et al. 2007). Pero los glaciares, y los paisajes resultantes de su presencia o dinámica, no son estáticos, responden a los cambios climáticos y avanzan o retroceden constantemente. El avance de los glaciares en toda la Tierra –como ocurrió hace 20.000 años durante el Último Máximo Glaciar (LGM), hace 12.000 años en el periodo Tardiglaciar, o hace sólo 400 años, en la PEH–, implica que los glaciares se forman en superficies previamente libres de hielo, las remodelan y cambian, las ocupan. Ante esto la humanidad ha respondido de dos modos, huyendo, esto es desplazándose masivamente hacia el sur, como hicieron el hombre moderno y los neandertales en la última glaciación dirigiéndose hacia la península Ibérica; o enfrentándose con plegarias y rogatorias en los siglos XVIII y XIX en los valles suizos, franceses e italianos para impedir el avance de los glaciares alpinos sobre las praderas de altura ocupadas por cabañas y pastores en el verano. Estos mismos glaciares destruirían porciones de las calzadas romanas construidas 2.000 años antes para facilitar el paso de los puertos alpinos, sin glaciares en ese momento. Paisajes, pues, cambiantes, que implican adaptaciones de las sociedades y de la naturaleza. Sin embargo, la devastadora actividad de los glaciares deja terrenos yermos, necesitados de milenios para el desarrollo de suelos, la colonización vegetal y el uso humano, y durante su retroceso generan inundaciones, por roturas de las bolsas de agua de su interior, auténticos embalses de gran capacidad que afectan valle abajo, y desprendimientos de bloques de hielo que lo arrasan todo a su paso antes de fundirse. Es un medio, pues, difícil y peligroso, cambiante a diferentes escalas espaciales y temporales que no favorece la ocupación humana. Con el retroceso, pues, desaparecen los paisajes glaciares, y surgen otros nuevos, los paraglaciares y periglaciares, caracterizados por la inestabilidad, la dinámica asociada al hielo, ahora al hielo permanente en el suelo, el permafrost, o a los cambios de estado del agua (congelamiento y descongelamiento) diarios o estacionales. Un nuevo medio ecológico y una nueva dinámica impuestos por los cambios climáticos del presente y del pasado, donde los paisajes y los procesos geomorfológicos y ecológicos son sustituidos por otros de igual valor natural. Es aquí, donde lo humano, con nuestra inherente entidad cultural, aprecia una pérdida paisajística, si bien, desde una perspectiva natural, sólo es sustituida por sí misma. Pero a escala humana la pérdida paisajística es irremediable.

PAISAJES DE HIELO QUE DESAPARECEN: LOS GLACIARES DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

La alta montaña constituye un paisaje singular definido por la presencia de la roca y el agua helada, tanto en el subsuelo, como en forma de nieve o glaciares. La alta montaña glaciada ha conocido pérdidas de volumen recientes y muy rápidas que han implicado cambios de paisajes drásticos y repentinos (Figura 1), estimado entre finales del s.XIX y la actualidad en más de un 20% de su extensión.

Los datos sobre balances de masas y longitud de los glaciares de la Tierra muestran que el 83% de los glaciares han perdido volumen y extensión, a un ritmo de $0,31 \text{ m a}^{-1}$ de retroceso, entre 1970 y 2010 (Figura 2), proceso que se incrementa en las últimas décadas (Dyurgerov and Meier, 2005; WGMS, 2011). En la actualidad los glaciares de montaña ocupan $785.000 \pm 10.000 \text{ km}^2$, de los cuales el 68% están fuera de la Antártica y Groenlandia, lo que representa un 51% del volumen de hielo de la Tierra. Sin embargo la importancia de estos glaciares reside en su rápida respuesta y que afectan directamente a la población y a los cambios paisajísticos regionales y locales. Los glaciares de montaña perdieron una media de 260 billones de toneladas métricas de hielo anualmente durante la última década, con importantes implicaciones para el nivel del mar, la hidrología, la ecología y las poblaciones que habitan las montañas (Kalterborg et al. 2010).

Las predicciones sobre la evolución de los glaciares apuntan a una pérdida entre el 10% y el 80% para finales del s.XXI, centrados en el Ártico (Canada, Alaska, Groenlandia), los Andes meridionales y el Himalaya, según diferentes escenarios, para incrementos de temperaturas de $0,01^\circ\text{C a}^{-1}$ o $0,04^\circ\text{C a}^{-1}$, de modo que el escenario medio señala la pérdida de un 40% el volumen de hielo de la Tierra para un ascenso térmico de $0,02^\circ\text{C a}^{-1}$.

Este hecho significa la práctica desaparición de los glaciares de montaña, dado el gran volumen de hielo en la Antártica y Groenlandia, la escasez de agua para la población del somontano y cambios en los regímenes hidrológicos.

En los Pirineos se localizan los únicos glaciares de la península Ibérica, aunque existen masas de hielo heredadas, heleros, en los Picos de Europa y Sierra Nevada. Los glaciares actuales son una herencia de la Pequeña Edad de Hielo, pequeños glaciares que desde finales del s.XIX sufren un retroceso muy acusado (Figura 3). A principios del s.XX los glaciares pirenaicos ocupaban una superficie aproximada de 3.300 ha (Schrader, 1936), pero en la actualidad han perdido aproximadamente un 88% de su extensión (unas 2.900 ha) y sólo cubren 390 ha (ERHIN, 2011). Actualmente existen 21 pequeños glaciares en los Pirineos (10



Figura 1. Cambios de paisaje por fusión y retroceso del Glaciar Muir, Alaska, en los últimos 41 años (NSIDC Glacier Photograph Collection. Boulder, Colorado USA. /World Data Center for Glaciology. Digital media). A la vista de la fotografía es innegable el cambio paisajístico operado en la alta montaña.

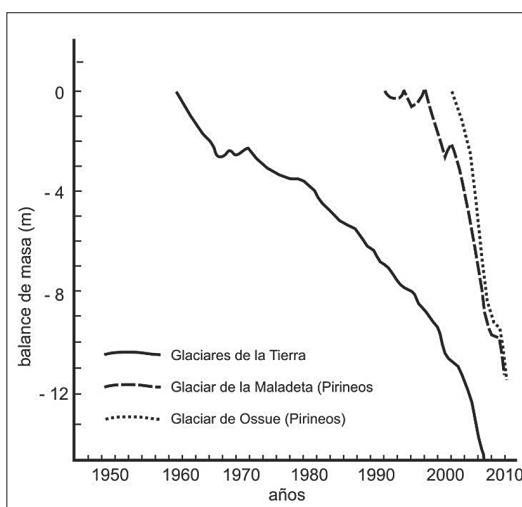


Figura 2. Evolución del balance de masa de los glaciares de la Tierra en los últimos 60 años comparada con la evolución reciente de dos glaciares pirenaicos (Ossoue y Maladeta). Fuente: WGMS, 2011.

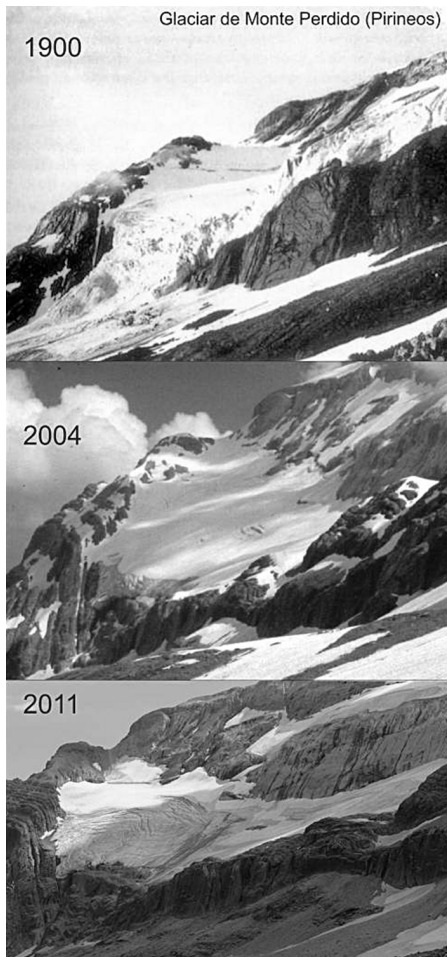


Figura 3. Evolución de la masa de hielo del glaciar de Monte Pedido (Pirineos) entre 1900 y 2011, donde se aprecian significativos cambios de paisaje. Foto 1: L. Briet. Fotos 2 y 3: Enrique Serrano.

en el lado español y 11 en el lado francés), situados por encima de 2.700 m de altitud, y con claras huellas de su reducción (Figura 4).

El retroceso glaciar en el Pirineo español es evidente a partir de los datos disponibles (Tabla 1, Figuras 3 y 4). Aunque Schrader posiblemente hizo una estimación al alza, a partir de 1982 (Martínez de Pisón y Arenillas, 1988; Chueca, 2002; Martínez de Pisón et al. 2004, González Trueba et al. 2008; ERHIN, 2008; 2011) el hielo desaparece rápidamente, alcanzando una pérdida total del 86% en 15 años. Dadas sus reducidas superficies actuales, los retrocesos ligados a veranos calurosos, como 2012, pueden significar su desaparición definitiva. Por ejemplo, en 2012, la desconexión entre la porción superior de Aneto, que alimentaba la zona oriental, y la inferior, implica la inexistencia de la necesaria alimentación, y una rápida desaparición (Figura 5).



Figura 4. Estado actual (2010) del glaciar de Boum (Pirineos), pequeña masa de hielo estratificado alojado en la umbría de la pared norte del Pico Boum (Fotografía: E. Serrano).

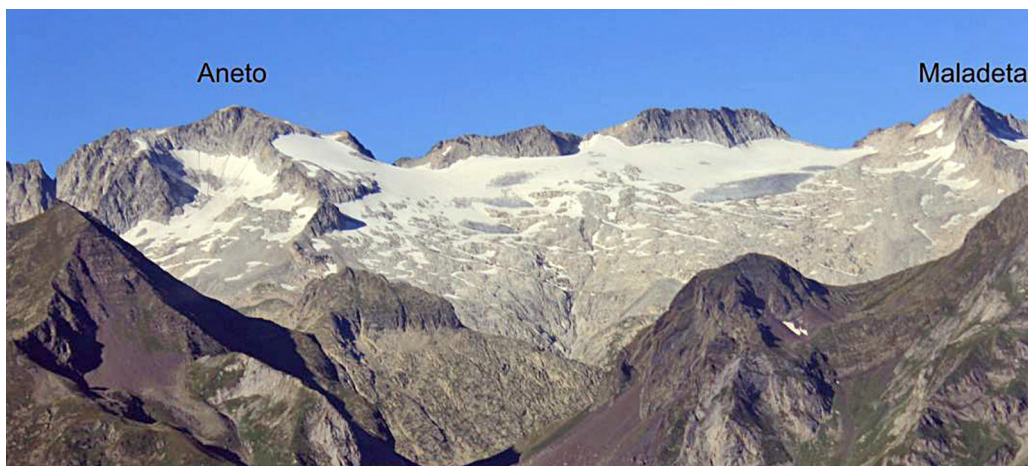


Figura 5. El glaciar de Aneto en 2011 (Fotografía: E. Serrano).

Macizo	Superficie (ha)								Pérdida 1894-2008
	1894	1982	1991	1994	1998	1999	2001	2008	
Balaitus	55	18	15	13	5	2	0	0	100 %
Infierno	88	62?	66	55	43	41	41	20	77 %
Viñemal	40	20	18	17	8	6	2	1	98 %
Taillón	–	10	2	2	1	<1	0	0	–
Monte Perdido	556	107	90	74	52	48	44	38	93 %
La Munia	40	12	10	8	3	0	0	0	100 %
Posets	216	55	48	48	35	34	34	25	88 %
Perdiguero	92	10?	17	9	<1	0	0	2	100 %
Aneto- Maladeta	692	314	302	249	169	163	162	121	82 %
Besiberri	–	–	6	6	6	6	6	0	–
TOTAL	1779	608	574	481	322	300	290	86	86 %

Fuente: programa ERHIN

Tabla 1. Pérdida de superficie en los glaciares pirenaicos (1894-2008).

Un número indeterminado de los glaciares existentes a principios de siglo, cercano a la decena, han desaparecido por la fusión total de las masas de hielo, una respuesta rápida de los glaciares al ascenso de temperatura de 0,9°C desde 1890. A partir de la estimación del ascenso de la altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar (ELA), se ha constatado la desaparición de los glaciares hacia 2050. Los cálculos muestran que la rápida fusión durante los últimos 15 años ha causado una reducción del 50 a 60% de la superficie de los glaciares más grandes (González Trueba et al. 2008), y la regresión total de los más pequeños, transformándose en heleros, ya sin deformación ni movimiento (Figura 6), que adelantan el final de la alta montaña glaciar.

A finales del siglo XIX geógrafos franceses y alemanes, Saint Saud y Penck, descubrieron la existencia de pequeños glaciares en sus cumbres y los señalaron e incluso cartografiaron someramente para dejar constancia de su existencia.

Cuando los montañeros comenzaron a frecuentar estas montañas ya no existían más que exiguas manchas de hielo heredadas de la PEH, pero que eran los restos más importantes de hielo de la Cordillera Cantábrica. Los estudios detallados (González Trueba, 2007) permitieron saber que durante la PEH existieron otros focos glaciares, ya extintos en el siglo XIX, con un total de seis pequeños glaciares. Del mismo modo que en los Pirineos, los glaciares y después los heleros han sufrido un retroceso rápido que ha llevado a la existencia de cuatro heleros, dos



Figura 6. Helero de Posets en 2004, masa de hielo estratificado y parcialmente cubierta de clastos, sin deformación, vestigio del glaciar de Posets. (Fotografía: E.Serrano).

de ellos enterrados bajo una capa de clastos que los protege. La pérdida superficial alcanza casi el 70%, con sólo 6,1 ha de hielo en todo el macizo (Tabla 2). En el Jou Negro el retroceso más acusado sucedió en el periodo 1980-1996, seguido de una ralentización derivada de su escaso tamaño y parcial recubrimiento de clastos.

Nombre	Tipo	Superficie PEH (ha)	Superficie actual (ha)	Pérdida Superficial
Jou Negro	Helero	5,2	2,1	51,7 %
Llambrión	Helero	6,1	1,5 *	75,7 %
Palanca	Helero	4,1	1,3 *	68,2 %
Forcadona	Helero	3,3	1,2 *	61,7 %
Total		18,7	6,1	67,4%

Fuente: González Trucba, 2007; Serrano et al. 2011. * Datos de 2006.

Tabla 2. Datos de extensión y pérdida superficial en las masas de hielo de los Picos de Europa.

El retroceso y desaparición de los glaciares significa la transformación de los paisajes con hielo a paisajes modelados por los glaciares, hecho común a todas las montañas de la Tierra (ver Figura 1). Cuando el hielo desaparece los procesos cambian, al arrastre y desplazamiento del hielo le suceden la erosión de las aguas proglaciares y de la fusión nival, la acción del frío sobre el sustrato que congela el agua en el suelo o somete a ciclos de hielo deshielo a la roca y los sedimentos. La liberación de la presión ejercida por el hielo se traduce en esfuerzos de relajación que facilitan la producción de clastos y su transporte hacia el fondo del valle con ayuda de la gravedad, el hielo en el suelo y la escorrentía. El hielo desaparece y cambian los regímenes hidrológicos, ahora con un descenso de los caudales estivales y dependencia de las precipitaciones. La ecología de su entorno inicia procesos de adaptación a las nuevas condiciones hidrológicas y el paisaje cambia drásticamente, de un paisaje glaciar a uno deglaciado o periglacial. Durante un periodo de centenas a milenios, la inestabilidad hace que estos ambientes sean muy activos, con cambios constantes de importantes consecuencias ecológicas, en ellos se inicia la colonización de la vida, vegetal y animal, que conlleva su transformación. Un paisaje, de este modo, es sustituido por otro, sus elementos cambian, pero su valor permanece.



Figura 7. El helero del Jou Negro (en 2011), situado en el circo del mismo nombre y al pie de la cumbre más alta de la Cordillera Cantábrica, Torre Cerredo. Se aprecia la morrena frontal, que delimita la extensión del antiguo glaciar durante la Pequeña Edad de Hielo. (Fotos: E. Serrano).

Macizos	Ley 2/90 1991	Decreto 216/2007	2011*
Balaitous	Las Frondellas	H	--
	Brecha Latour	H	--
Infierno	Infierno oriental	H	H
	Infierno occidental	G	Glaciar
		Infierno H	--
		Pta Zarra H	--
		Argualas GR	
Vignemale	Clot de la Hount	H	H
	Tapóu-Monferrat	H	--
Monte Perdido	Perdido Superior	G	Glaciar
	Perdido Inferior	G	Glaciar
	Marboré	H	H
	Añisclo (Soum)	H	--
La Munia	Robiñera	H	--
Posets	Llardana	G	Glaciar
	Posets	G	H
	La Paül	G	Glaciar
		Gemelos GR	GR
		Eriste H	--
Perdiguero	Literola	H	--
		Remuñé H	--
		T. Remuñé H	--
Maladeta	Alba	H	--
	Maladeta	G	Glaciar
	Aneto	G	Glaciar
	Barrancs	G	Glaciar
	Tempestades	G	Glaciar
	Salencas	H	--
	Coronas	G	H
	Llosás	--	--
	Vallibierna	--	--
		Cregüeña H	--
	Alba GR	GR	
TOTAL			
Glaciares	24	11	9
Heleros	--	17	5
Desaparecidos		2	16

Glaciares. G, Heleros: H; Glaciares rocosos: GR. * Fuente, ERHIN, 2011

Tabla 3. Monumentos Naturales de los Glaciares Pirenaicos: Glaciares seleccionados en función de la ley 1991, decreto 2007 y la actualidad (ERHIN, 2011).

En este marco, se pierden y ganan valores naturales, pero Espacios Naturales Protegidos como el Monumento Natural de los Glaciares Pirenaicos, protegido por la ley 2/1990 (BOA nº36 de 28/03/90), se ven profundamente transformados, pues los elementos a proteger han desaparecido de modo natural. El objetivo de dicha ley es «conservar y proteger áreas de paisaje efectivo de alta montaña con volúmenes de hielo permanente y apreciables, para destinarlas a finalidades educativas, científicas, recreativas y culturales», sin embargo algunos de estos paisajes no existen o han cambiado significativamente. Pero sus valores culturales permanecen y su uso prioritario continua teniendo sentido, de modo que sólo una óptica más amplia, es decir declarar ENP a ámbitos de alta montaña con glaciares y no sólo a glaciares como elementos, propicia una efectiva gestión y conservación al margen de su evolución natural. Los inventarios de glaciares (Tabla 3), siempre con la relatividad derivada de la dificultad de diferenciar entre glaciares y heleros, permiten observar que además de una considerable pérdida de superficie, se han perdido elementos, el 35,5% de los glaciares existentes en la ley de 1991 y el 53% de los aparatos (heleros y glaciares) desde 2006. Las cifras son suficientemente representativas como para demostrar que son paisajes en desaparición, sustituidos por una alta montaña rocosa, que también merece ser conservada y valorada como soporte de la criosfera –ahora de la nieve y el hielo en el suelo–, y por sus valores naturales, ecológicos y culturales, que persisten de su pasado glaciogénico.

TÉCNICAS DE ESTUDIO EN HELEROS Y GLACIARES

El estudio de los glaciares es una tarea apasionante que se basa en la aplicación de la observación y técnicas más o menos sofisticadas para conocer la pérdida de superficie y volumen de los glaciares, el balance de masa –la porción de hielo ganada o perdida cada año–, o el comportamiento y dinámica del glaciar o cuerpo de hielo, estableciendo si se deforma, se desliza o está inmóvil. La combinación de métodos (glaciológicos, históricos, arqueológicos y geomorfológicos) y técnicas (geofísicas, geomáticas, cartográficas, edafológicas y dendrológicas) aplicadas a su estudio, permite conocer su evolución reciente y dinamismo, y la reconstrucción detallada de su pasado reciente y su dinámica actual (Zumbühl y Holzhauser, 1988; Benn and Evans, 2010). Ahora bien, no siempre es posible aplicar todas las técnicas y en el caso de los Pirineos y los Picos de Europa, han sido las hidro-meteorológicas, geofísicas, geomáticas, geomorfológicas e históricas las aplicadas en los diferentes glaciares y heleros.

El inventario de fotos y documentos históricos, así como las fuentes escritas de montañeros y naturalistas son de gran utilidad para conocer la existencia de los glaciares y la evolución de las masas de hielo durante el s. XX, su extensión y morfología. Ha sido ampliamente utilizado en los Alpes, pero también de forma muy útil en los Pirineos (Martínez de Pisón, 1988; Martínez de Pisón y Álvaro, 2002) y en los Picos de Europa (González Trueba, 2007). En los Pirineos existe abundante información desde que en el s.XVIII Ramond de Carbonières inicia las exploraciones y realiza la primera ascensión al Monte Perdido, y los pirineístas del s. XIX levantan mapas y realizan magníficos panoramas y fotografías de los glaciares (Figura 8), fuentes inmejorables para el conocimiento de los paisajes glaciares, pero también un bagaje cultural inherente a la alta montaña pirenaica (Beraldi, 1898-1904; VVAA, 2000; Martínez de Pisón y Álvaro, 2002). Frente a la abundante información de los Pirineos (Martínez de Pisón y Arenillas, 1988; Martínez de Pisón y Álvaro, 2002), en



Figura 8. «Le Pic du Vignemale», pintura al óleo sobre tabla de Franz Schrader realizada hacia 1900, donde se representa el glaciar de Oulettes de Gaube, en el macizo del Vignemale.

los Picos de Europa las fuentes, imágenes y mapas son más escasas (Tabla 4) y posteriores a 1893 (González Trueba, 2007; González Trueba y Serrano, 2007; Serrano y González Trueba, 2013). La información cuidadosamente analizada, aporta datos muy útiles para conocer la evolución y tendencias de los glaciares y son fundamentales para la reconstrucción de la PEH en combinación con las técnicas glaciomorfológicas. La geomática y sus distintas técnicas, levantamientos topográficos, Láser Escáner Terrestre (TLS), Sistemas de Posicionamiento Global Diferencial (DGP-RTK) y fotogrametría terrestre permiten conocer las principales geométricas y los cambios anuales de las masas de hielo (Sanjosé et al., 2007, 2010). La fotogrametría de objeto cercano requiere situar puntos de control en zonas estables, lo que ha menudo dificulta las labores de campo. Los Láser Escáner Terrestres con equipos que alcancen al menos los 1.000 m toman 50.000 puntos por segundo con errores posicionales de 3 cm, por lo que su precisión y rapidez les hacen muy eficaces y se están aplicando a glaciares pirenaicos y heleros de los Picos de Europa y Sierra Nevada (Sanjosé et al. 2007; 2010; Serrano et al. 2006; 2010; 2011). Las técnicas de GPS-RTK poseen como principal limitación las dificultades de acceso en las campañas de campo, si bien su rapidez y precisión posibilitan detectar y cuantificar el movimiento, como se ha hecho durante diez años en los glaciares rocosos de Posets y Argualas (Serrano et al. 2006; 2010). Con estas técnicas se obtienen cartografías detalladas anuales con la pérdida y ganancia de volumen, de modo que el control de su fusión o avance pueden ser evaluados con precisiones centimétricas. La aplicación de técnicas geomáticas en el helero del Jou Negro en Picos de Europa (Serrano et al., 2011) ha permitido detectar cambios en superficie debidos a la fusión y el deslizamiento de la masa, así como cartografiar su típica morfología de fusión.

Documentos	Año	Tipo	Autor
Imágenes y fotos	1893	Paisaje	Saint Saud
	±1930	Retratos de gentes	Unknown
	±1980	Paisaje	Isidoro Rodriguez
	1995	Paisaje y detalles	J.J. González Suárez
	1996	Paisaje y hielo	E. Serrano
	2003	Paisaje y detalles	JJGonzález Trueba
	2006/2013	Detalles y paisaje	PANGEA
Mapas	1892	Esquemas	Saint Saud
	1922	1/50000	Saint Saud and L.Maury
	1935	E.1/25000	J.M. Boada and G. Gereta
	1954	Mapas	Saint Saud and L. Maury
	1994/1998	Esquema geomorfológico	JJ González Suárez and V.Alonso
	2007	Mapa Geomorfológi-co 1/10000	J.J. González Trueba
Documentos escritos	1860	Artículo científico	Casiano de Prado
	1894	Artículo de viajes	Saint Saud and P.Labrousche
	1897	Artículo científico	A. Penck
	1900	Esquemas de campo	W. Schulze
	1914	Libro científico	H. Obermaier
	1915	Artículo de montaña	J. Fernández Zabala
	1918	Libro de montaña	Pedro Pidal y J. Fernández Zabala
	1922	Libro, geografía	Saint Saud
	1994/98	Artículo científico	J.J. González Suárez and V.Alonso
	1995	Nota científica	M. Frochoso and J.C. Castañón
2007	Libro científico	J.J. González Trueba	

Tabla 4. Documentos históricos y recientes sobre el helero del Jou Negro

Las técnicas geofísicas son usadas ampliamente para conocer la estructura del terreno y sus propiedades. Cada una de ellas se basa en el diferente comportamiento que las ondas mecánicas y los campos eléctricos o magnéticos tienen en función de las características físicas del subsuelo. Así, las técnicas sísmicas, las geoelectricas, geomagnéticas y de radar, se utilizan en el campo de la prospección petrolífera, en minería, arqueología, etc. Estas técnicas suelen complementarse con la prospección mediante extracción de catas puntuales, lo cual permite relacionar las citadas propiedades obtenidas de manera indirecta mediante la prospección geofísica (no destructiva) y su determinación directa mediante la medida de las mismas en muestras físicas del subsuelo (destructiva).

En el caso concreto y especial de su aplicación en estudios de glaciología, por una parte, las técnicas de extracción de catas del terreno glaciar suele llevar aparejada una infraestructura de equipamiento y medios que dificulta su aplicación en terrenos de alta montaña y, generalmente por tanto, de difícil acceso. Por otra parte se ha de considerar del hecho de que al ser una técnica destructiva, su uso debe ser en todo caso limitado, con el fin de no deteriorar el frágil espacio glaciar. Además, algunas de las técnicas geofísicas antes citadas, o son difícilmente utilizables o poco eficientes en cuanto a sus resultados. En concreto, las más usadas en la prospección de glaciares son las geoelectricas y las de radar –georadar en nuestro caso–. De ambas, el georadar permite una prospección más cómoda y eficaz si se tienen en cuenta las dificultades intrínsecas de los trabajos de campo. Por ello, el georadar suele ser la herramienta más utilizada para el estudio de la montaña glaciada.

GEORÁDAR APLICADO A LA GEOMORFOLOGÍA GLACIAR: PICOS DE EUROPA Y PIRINEOS

El paisaje se nos muestra siempre incompleto, solo vemos de él una parte. Los océanos, las grutas, los cauces fluviales esconden más de lo que muestran. También los paisajes glaciados nos ocultan una parte –a veces mayor que la visible– que muchas veces nos inquieta. La curiosidad, por un lado, nos hace querer saber cómo es esa parte no revelada. También el convencimiento de que debemos conocer determinados aspectos de ese paisaje –su estructura, profundidad, etc– si queremos entender cómo evoluciona o gestionar recursos, como las aguas, y potenciales riesgos asociados a ellos. Ello nos permite establecer modelos y, en su caso, prever el momento de su extinción y cómo será el paisaje que lo sustituya.

En los últimos años se ha extendido el uso del georadar (GPR) en glaciología, bien sobre zonas glaciares propiamente dichas, en heleros, y también en zonas periglaciares con presencia de permafrost en el subsuelo (Schwamborn et al., 2008; Arcone and Kreutz, 2009; Monnier et al., 2009). El éxito de este dispositivo como herramienta de prospección geofísica se debe a varios factores. Por una parte, su versatilidad, que permite su uso tanto para prospección de pequeñas superficies –decenas de metros– como para cubrir amplias áreas glaciadas –varios kilómetros–, en prospecciones de gran profundidad como son las realizadas en la Antártica –varios cientos de metros– y también en estudios en los que la penetración requerida es pequeña –menos de un metro–. Por otro lado, destaca su rapidez relativa en la captación de datos en el trabajo de campo, que permite estudiar amplias extensiones en unas horas. Esta rapidez se basa en la portabilidad de los equipos y su autonomía de funcionamiento, lo cual hace que se puedan utilizar razonablemente bien en zonas de complicada accesibilidad, como suele ser el caso de las prospecciones en alta montaña. También es importante su carácter no invasivo con el medio en el que se utiliza, normalmente protegido en el caso de su aplicación a zonas glaciadas. Y por último, la posibilidad de efectuar de manera relativamente sencilla el tratamiento de los perfiles obtenidos en la prospección e integrarlos en aplicaciones que permiten establecer modelos de la estructura y propiedades físicas del subsuelo. No obstante, esta técnica requiere una adecuada interpretación de las imágenes –o radargramas– que se obtienen del subsuelo, lo cual no siempre es sencillo y su dificultad varía en función del terreno en el que se utiliza y de las condiciones concretas en que éste se encuentre (por ejemplo contenido de agua).

En esencia el georadar es un dispositivo emisor-receptor de ondas electromagnéticas en el rango de las microondas. Su funcionamiento se basa en que estas ondas electromagnéticas –luz no visible si se permite la paradoja– se propagan de diferente forma en función del medio sobre el que viajan. También, en el hecho de que su comportamiento es similar al de las ondas mecánicas, en el sentido que se refleja y refractan de modo parecido a éstas. Por ello, al llegar las ondas a una zona de cambio de propiedades del subsuelo –interfase– se producen reflexiones y refracciones que pueden ser visualizadas en el equipo a modo de radargramas.

Una adecuada interpretación de estos radargramas nos permite determinar la velocidad de propagación de las ondas y deducir así las propiedades eléctricas del medio en el subsuelo, y también establecer la profundidad y estructura de éste. La versatilidad del georádar viene dada porque pueden emplearse diferentes antenas emisoras-receptoras que generan-reciben ondas de diferentes frecuencias, aproximadamente desde 1 MHz a 2 GHz. La frecuencia de las ondas determina el alcance en profundidad y su resolución, aunque ambos varían en función del medio en que se propagan. Simplificando, podemos establecer que a menor frecuencia mayor es su alcance pero menor es su resolución, es decir, menor es la precisión de los valores de los parámetros que determinemos.

En la Figura 9 podemos ver el equipo de georádar utilizado en nuestras prospecciones que básicamente está formado por las antenas (de 50, 200 y 500 MHz), las unidades centrales y el ordenador que nos permite visualizar los radargramas obtenidos. Como puede verse, las antenas más grandes se corresponden con las de menor frecuencia, debiendo situarse además a mayor distancia una de otra para la correcta captación de las señales.

Para nuestros estudios hemos utilizado dos técnicas básicas de captación de radargramas: La denominada 'Punto Medio Común' (CMP) y la de prospección directa por desplazamiento en la superficie. La primera permite determinar la velocidad de las ondas en el medio y la segunda nos muestra la topografía interna del subsuelo.

Entre los años 2007 y 2012 hemos llevado a cabo diferentes estudios con georádar en glaciares y heleros de Picos de Europa y Pirineos, con el objetivo de conocer su estructura, potencia y evolución, y utilizarlos, dada su elevada sensibilidad, como indicadores del cambio climático.

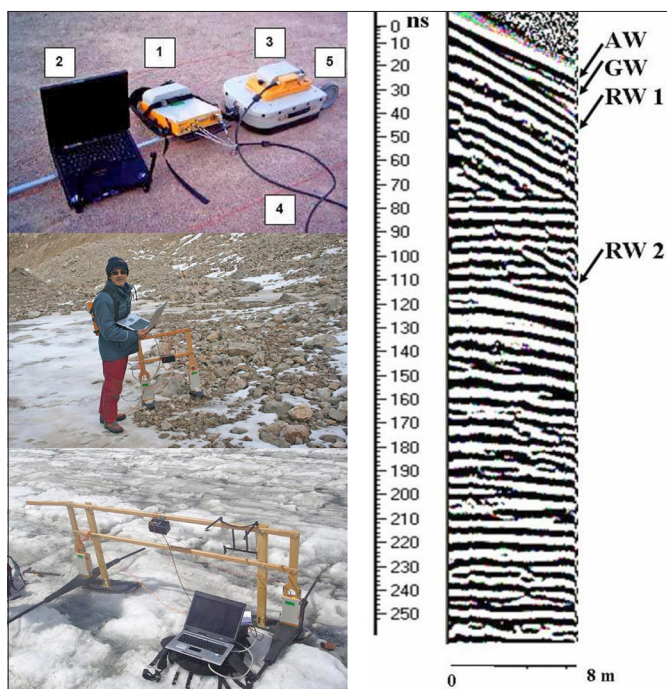


Figura 9. Izquierda, equipo de georádar utilizado en el trabajo de campo, con diferentes antenas emisoras-receptoras. Derecha, radargrama CMP obtenido en Jou Negro durante la campaña de 2008.

Se visualizan las trazas de las ondas aérea (AW), superficial (GW) y de las reflexiones bajo el subsuelo (RW1, RW2).

(Del Río et al., 2009).

Determinación de la velocidad de propagación de las ondas

Para conocer el espesor de la capa de hielo o nieve de un glaciar o helero, hay que obtener primero el valor de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el mismo. De este modo, conociendo el tiempo que tardan las ondas en viajar desde la antena emisora hasta la receptora y la citada velocidad se obtiene de manera sencilla la profundidad a la que se encuentra una determinada interfase reflectora y, así, podemos saber el espesor de la capa de hielo glaciar.

En los años 2007 y 2008 hemos llevado a cabo sendas campañas que nos han permitido determinar las velocidades de propagación de las ondas en el helero del Jou Negro en Picos de Europa (Figura 9). Los trabajos de campo se llevaron a cabo durante el mes de octubre en ambos años de modo que hubiera finalizado el periodo de deshielo y antes del de nevadas de invierno, con el fin de facilitar la tarea de captación de los radargramas, al estar el helero en esa época libre de nieve reciente.

La técnica CMP, que llevamos a cabo con las antenas de 200 MHz, consiste en situar el georádar en un punto fijo del terreno e ir separando las antenas entre sí, emitiendo a cada distancia fija un pulso de señal, de manera que obtenemos un radargrama con el conjunto de las señales captadas. En la Figura 9, podemos ver las trazas correspondientes a las ondas aérea (AW), superficial (GW) y dos reflejadas en el subsuelo (RW1, RW2), obtenidas durante el trabajo de campo de 2008. En él se aprecia que conforme las antenas se van separando el tiempo de vuelo de las ondas es mayor, obteniéndose líneas de distinta inclinación. Conociendo las distancias entre antenas y el tiempo de vuelo en cada punto, determinamos las velocidades de las ondas y también la profundidad a la que se producen las reflexiones. Concretamente, en Jou Negro hemos obtenido velocidades entre 0,168 y 0,209 m ns⁻¹ y varias reflexiones a profundidades de en torno a 1,5-1,7, 4,8-5,5 y 9,2-12,3 m, dependiendo de la zona del helero donde se hizo la toma de datos (Del Río et al., 2009). Los valores de las velocidades son consistentes con los citados en la bibliografía para hielo (0,150-0,173 m ns⁻¹) y nieve (0,212-0,245 m ns⁻¹) (Brandt et al., 2007) y las profundidades de las reflexiones nos sugieren la existencia de una estructura interna del helero en al menos tres capas.

Análisis mediante perfiles GPR

Con el fin de estudiar la estructura interior del glaciar o helero es necesario realizar perfiles de prospección a lo largo y ancho de toda su extensión. Este tipo de estudios, los hemos llevado a cabo en el Jou Negro, en Picos de Europa, y en los glaciares La Paúl y Ossoue, en el Pirineo.

Normalmente la interpretación de los perfiles obtenidos suele ser complicada, sobre todo en heleros y glaciares relativamente pequeños como son los existentes en la Península Ibérica. El motivo es la existencia en estos casos de materiales arrastrados por el glaciar que se depositan en el interior dificultando, en muchos casos, la correcta visualización del sustrato. También la existencia de grietas, escorrentías, etc. que dan lugar a la presencia de agua tanto en la superficie como en su interior, produce una dificultad añadida que afecta tanto al proceso de captación de los perfiles como a su posterior interpretación.

En el estudio del Jou Negro, hemos utilizado antenas de 500 y 200 MHz, con el fin de disponer de radargramas con diferente alcance en profundidad y distinta resolución. La antena de 500 MHz nos permitía llegar a priori hasta una profundidad de entre uno y dos metros –con resoluciones de pocos centímetros–, en tanto que la de 200 MHz alcanzaría profundidades de hasta 30-40 m, con una resolución en torno a 0,5 m. Realizamos perfiles en tres zonas distintas del nevero –noreste, central y suroeste– a fin de cubrir sus 0,21 ha de superficie helada.

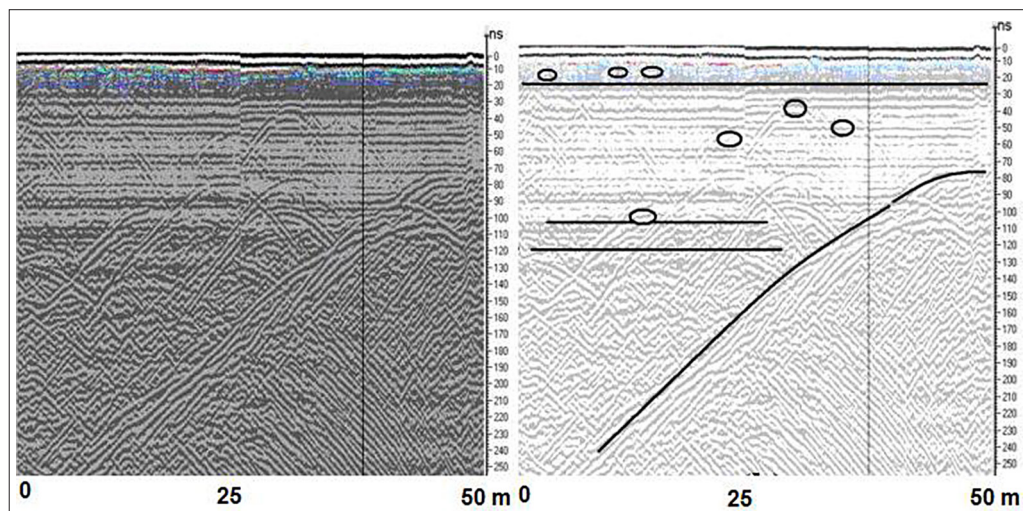


Figura 10. Perfil compuesto con los radargramas obtenidos con las antenas de 200 MHz en el nevero Jou Negro en 2007 –original y editado–. Se observa la composición de un perfil de 50 m de longitud captado con las antenas de 200 MHz en la zona suroeste, próxima a la morrena frontal mostrando una primera aproximación de su estructura. (Del Río et al., 2009).

Como vemos (Figura 10), existe una primera capa en la parte superior que correspondería al depósito de hielo-nieve formada por precipitación de nieve y su posterior compactación. Seguidamente se extiende hacia el fondo una capa más o menos continua de hielo hasta llegar a un fondo rocoso en el que se acumularían esparcidas rocas detríticas, identificadas a partir de las señales hiperbólicas presentes en los radargramas. Por otra parte, a partir de la identificación de las reflexiones del fondo rocoso y su ubicación en la escala de tiempo del radargrama, así como de las velocidades calculadas con la técnica CMP, podemos saber que el espesor máximo del hielo en el helero se situaría en los 12 m (Del Río et al., 2009).

En el caso del glaciar La Paúl debido a su pequeña superficie –aproximadamente 7 ha–, y por tanto, previsiblemente escaso espesor, utilizamos también antenas de 200 y 500 MHz y realizamos perfiles que cubrían gran parte de su extensión. En este caso, realizamos el estudio en un día de finales de agosto de 2010 y los radargramas obtenidos nos permitieron identificar claramente el fondo rocoso del fondo del glaciar, tal como puede apreciarse en el perfil de 55 m de longitud que se muestra en la Figura 11. La profundidad máxima obtenida fue de 20 m situada en la zona central del glaciar, visualizándose una estructura similar a la del Jou Negro, aunque en este caso con una menor presencia de rocas detríticas dispersas en el fondo (Rico et al., 2012).

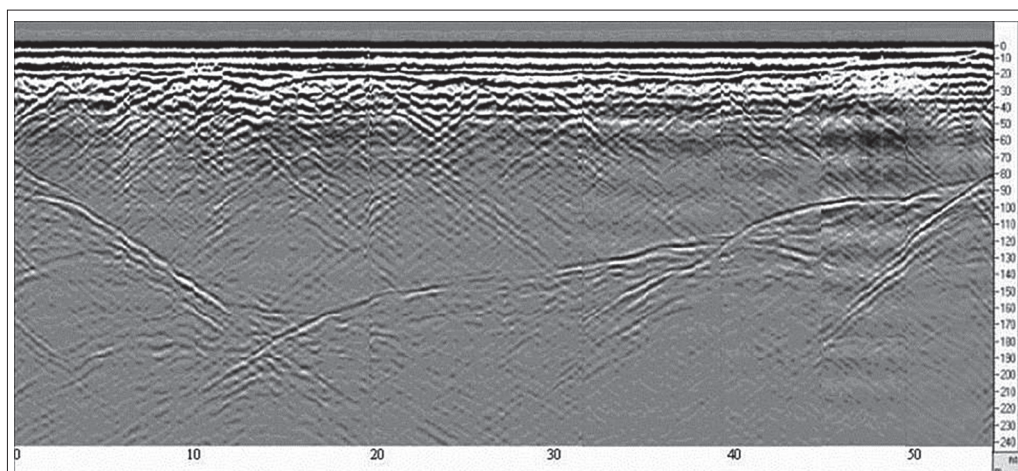


Figura 11. Perfil compuesto con radargramas obtenidos en el glaciar La Paúl con las antenas de 200 MHz en 2010.

En el estudio del glaciar Ossoue (Pirineos), llevado a cabo en dos días a finales de agosto de 2011, se obtuvieron radargramas con una longitud total de prácticamente 2 km, cubriéndose gran parte de las 50 ha de su superficie, concretamente la zona oeste y central del glaciar. Para este tipo de glaciares de mayor tamaño hemos utilizado antenas de menor frecuencia –50 MHz– que nos proporcionan un mayor alcance en profundidad, que en el caso de este glaciar se estimaba en más de 50 m. Ello nos ha permitido establecer su estructura interna y compararla con estudios anteriores realizados por otros autores. Para ello, asumimos como velocidad de propagación de la señal los $0,16 \text{ m ns}^{-1}$ establecidos por René para su estudio de 2006 en el mismo glaciar (René, 2007; 2011).

Como ejemplo, mostramos en la Figura 12 el perfil P1 que fue colectado siguiendo el eje central y longitudinal del glaciar, esto es de oeste a este, y que cubre una longitud total de 437 m. En él, podemos distinguir varias partes. En primer lugar se observa un escalón de 50 m de longitud con el que el fondo rocoso desciende desde la superficie hasta una profundidad de 25 m. Luego, tras un corto ascenso, se produce la bajada del fondo hasta los 45 m –profundidad máxima obtenida en el glaciar– que se sitúa a unos 130 m de distancia del inicio del perfil (Del Río et al., 2012; 2013). A partir de esa distancia, resulta más complicado realizar una interpretación del subsuelo, dado que las señales se vuelven distorsionadas, probablemente debido a la presencia de una capa subglacial en la que se acumularían rocas, sedimentos, hielo y agua. A partir de los 200 m de longitud desde el origen se detectan grandes reflexiones hiperbólicas cerca de la superficie que pueden estar asociadas a la presencia de una red de huecos que pudimos apreciar en esa zona del glaciar durante el trabajo de campo.

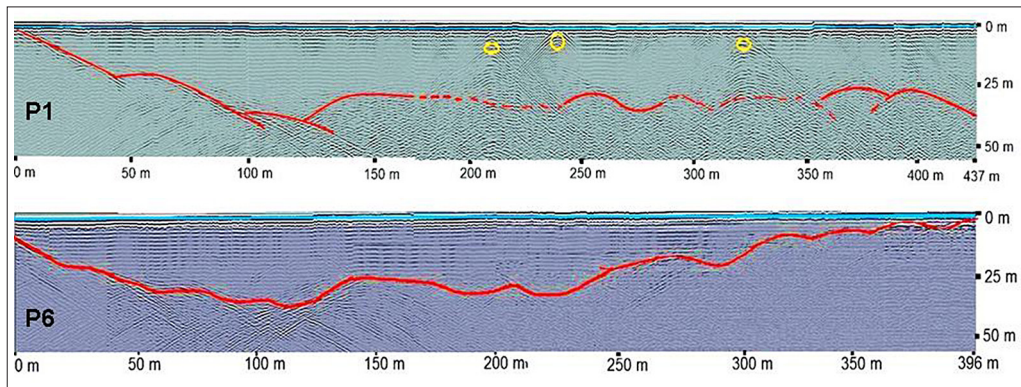


Figura 12. Perfiles GPR obtenidos en el glaciar Ossoue en dirección longitudinal (P1) y transversal (P6), captados con las antenas de 50 MHz. (Del Río et al. 2013).

En el caso de los perfiles transversales obtenidos de norte a sur, presentan un abrupto descenso hasta alcanzar profundidades máximas que, según el perfil, se sitúan en torno a los 30-40 m y, seguidamente, el fondo rocoso sube progresivamente hasta la superficie, tal como se puede ver a modo de ejemplo en el perfil P6 (Figura 12) de casi 400 m de longitud y que cubre todo el ancho del glaciar en su zona central.

Esta estructura es muy similar a la citada en el trabajo realizado en 2006 (René, 2007), ofreciendo una morfología subglacial coherente entre ambos estudios. Esto es, de oeste a este, los radargramas muestran en ambos casos un primer escalón que conforma una cubeta con una señal GPR muy clara, seguida por otra cubeta que se caracteriza por ofrecer una señal muy distorsionada que aparece a unos 100-150 m del comienzo del perfil. Transversalmente, los radargramas de 2006 muestran una asimetría similar a los obtenidos en nuestro estudio con descensos más abruptos y profundos en la zona norte, más próxima al Vignemale y picos adyacentes. El valor del espesor máximo de hielo obtenido en 2006 es ligeramente superior (50 m) al obtenido por nosotros (45 m). Aunque es difícil establecer cambios significativos con pérdida de espesor de hielo en el glaciar durante los cinco años transcurridos, dado que la resolución en profundidad dada por las antenas de 50 MHz utilizadas en ambos estudios es de 1,5 m aproximadamente, los balances de masa muestran fusión de hielo de 10 m entre 2000 y 2010 (René, 2011), lo que concuerda con la pérdida de 5 m de espesor de hielo en 5 años.

PAISAJES EN EXTINCIÓN Y PÉRDIDA DE PATRIMONIO CULTURAL Y NATURAL

Los glaciares forman parte de la imagen real y de la cultura del paisaje de los Pirineos y los Picos de Europa desde que los cartógrafos y naturalistas se ocupan de ellos en el s.XIX. Constituyen, pues, un paisaje natural que va desapareciendo, y un paisaje cultural que perdura.

En los Pirineos las primeras observaciones conscientes sobre glaciares proceden de pirineístas cultos, si en 1794 Francisco Zamora escribe de la Maladeta que «no hay memoria de haberlas visto libre de nieve» (Zamora, 1997), por esas fechas Ramond de Carbonieres contempla el glaciar de Monte Perdido desde la Brecha de Tucarroya y descubre el helero y su paisaje, aunque desconoce su extensión. Ramond, explorador de los Pirineos que comparte la nueva cultura del descubrimiento de los paisajes de montañas en Europa, señala en 1801 que el Monte Perdido «en la vertiente septentrional (...) se transforma enseguida en un vasto glaciar que desciende hasta el límite del lago, y cuya altura vertical es aproximadamente 800 m» (Ramond, 1801). Se ha descubierto de este modo un paisaje de hielo nuevo para el s.XIX y muy diferente del actual. La magnífica cascada de casi 800 m ha desaparecido y es un 93% más pequeño que cuando lo observó Ramond. En 1802 Ramond asciende al Monte Perdido, y cruza el glaciar de Soum, hoy desaparecido, cuya travesía «resultó bastante desagradable», por «las grietas que entorpecían la marcha». Al cruzar la rimaya mide la profundidad del hielo, 13 m, y ya la cumbre queda a su alcance, para de nuevo admirar el glaciar de Monte Perdido.

El mismo año de 1802, P. Dardenne describe las Maladetas «resplandecientes debido a sus seculares nieves», posteriormente Charpentier estudia el frente del glaciar de la Maladeta, y el naturalista ruso Parrot se propone «recorrer los Pirineos para estudiar el límite de las nieves perpetuas» y asciende a La Maladeta, junto al guía Barrau, en 1817. En su libro «Reise in der Pyrenäen» (Viaje a los Pirineos, 1823) describe el glaciar de la Maladeta, cuyo frente sitúa a 2682 m, cifra creíble, dado que horas después en la cumbre obtiene 3308 m, sólo un metro menos que la altitud asignada en la actualidad. Desde la cumbre describe los macizos «cubiertos de masas de nieve que pudieran ofrecer consideración para el estudio del límite de las nieves». Siete años más tarde, el guía Barrau muere en la Rimaya del glaciar de La Maladeta y desde entonces, con los guías horrorizados ante la presencia de grietas y rimayas, se frena la exploración de los glaciares pirenaicos, pero no su admiración desde los más hermosos balcones, en La Brecha de Tucarroya, Pineta o el Puerto de Benasque (Figura 13). El joven escocés James David Forbes, posteriormente eminente glaciólogo, viaja en 1835 desde Bagnères de Luchon y queda impresionado, «sus prodigiosos glaciares me parecen más grandes que los del Mont Blanc y comparables a los campos de hielo que caen hacia Grindewald» (Daraux, 2000). La exaltación de los paisajes helados pirenaicos de Ramond, Dardenne o Forbes atraerá a masas de naturalista, turistas y montañeros durante los 200 años siguientes, les cautiva el glaciar como paisaje, pero también como impedimento, barrera física y psíquica entre la montaña y lo humano.

En 1842 Thachatieff escribe que el glaciar de Aneto «se extiende hasta su cima. Posee numerosas hendiduras y grietas, pudiendo las más grandes llegar a medir a ojo de 2 a 3 metros de anchura». «Aquí (en los Pirineos), los glaciares dejan mucho que desear cuando queremos compararlos con los de los Alpes: su inferioridad, tanto por su aspecto como por su espesor, resulta evidente». Sin embargo, para realizar la primera ascensión al Aneto, Thachatieff y sus guías deciden evitar el glaciar de Aneto, y dan un amplio rodeo desde el norte para acceder por el sur del macizo, atravesando el pequeño glaciar de Coronas, hoy ya desaparecido, y que describe como una superficie «agrietada en varios puntos (...), se parece más a un alto nevero que a un glaciar propiamente dicho». En 1867 C. Packe, alpinista inglés que recorre los Pirineos y escribe la primera guía montañera, representa en un mapa los glaciares de los macizos de Maladeta (Figura 14), Posets y Literola (Packe, 1867). Con la llegada de los pirineístas, observadores sistemáticos, estudiosos y admiradores de los glaciares, comienza su inventario y cartografía, una sistemática posible gracias a la percepción de un paisaje, el glaciar, ajeno a la realidad montañesa y culta hasta el s.XIX. Lucas Mallada viaja por Huesca entre 1871 y 1877 para realizar el mapa geológico de la Provincia de Huesca, y señala la existencia de glaciares en Maladeta, Posets y Monte Perdido (Mallada,



Figura 13. A, «La Maladetta», dibujo de P. Gorse para *Les Pyrenées Monumentales et Pittoresques* (1870). B, «Le Mont Perdú et le massif calcaire vu des crêtes de Troumouse», acuarela de F. Schrader que representa la cascada de hielo del glaciar de Monte Perdido.

1878). Los pirineistas franceses, algunos especializados por macizos, como Ramond (1801) en Monte Perdido o H. Russell (1888) en el Vignemale, realizan valiosas aportaciones y mapas que representaron a distintas escalas los glaciares pirenaicos (VVAA, 2000). En 1875 Trutat publica mapas de la Maladeta y Posets más detallados, y le siguen Plandé, Schrader, Gourdon o Gourier que realizan cuidadas observaciones (Schrader, 1936, Gaurier, 1927) y cartografías que todavía despiertan el interés por los glaciares en las generaciones actuales. F. Schrader no sólo realiza el primer inventario exhaustivo, también un primer cálculo de la extensión de hielo (Tabla 1) y los representa en sus pinturas y vistas circulares (Saulé-Sorbé, 1994, 2007).



Figura 14. Detalle de la representación de los glaciares de La Maladeta, perteneciente al Mapa «Les Monts Maudits (Pyrenees)» by C. Packe 1866».

Todo ello constituye un bagaje cultural inherente a la alta montaña pirenaica, permanezcan o desaparezcan las masas de hielo. En los Picos de Europa los restos de glaciares, recónditos, escondidos en las alturas, no son conocidos por los pastores y montañeses y son los naturalistas y topógrafos los que descubren su presencia, incorporándose a la cultura más tarde que en los Pirineos (González Trueba, 2007, González Trueba y Serrano, 2007), con la descripción alpinística de Casiano de Prado en el Translambrión, en 1860, y las cartografías del pirineista y cartógrafo Conde de Saint Saud. Pirineista activo, explora los entonces denominados Pirineos Cantábricos y realiza entre 1890 y 1935 diferentes ascensiones y mapas de los Picos de Europa, describiendo en sus mapas y libros los pequeños glaciares cantábricos, hoy desaparecidos o transformados en heleros (Saint Saud, 1937). Los geógrafos alemanes, A. Penck (1897) y H. Obermaier (1914) divulgan su existencia, posiblemente basándose en las observaciones de Saint Saud, completando las pocas referencias escritas o artísticas a pesar de su elevado interés científico.

Las intenciones naturalistas de los pirineístas se acompañan de la divulgación mediante la pintura y la narración, en ellos se inscriben los magníficos cuadros de los glaciares pirenaicos de F. Schrader, o las cartografías de Packe, Schrader, Trutat, Wallon, además de la descripción de las formas más espectaculares en guías –sirva de ejemplo las guías Joanne o Baedeker– y artículos de divulgación de viajes o turismo. Una cultura se desarrolla en torno a los glaciares pirenaicos, y junto al desarrollo de un canon de belleza y atracción que reúne naturaleza, belleza y arte en torno a los paisajes pirenaicos (Martínez de Pisón, 2004; Saulé-Sorbe, 2007) se redescubren los glaciares, se divulga su presencia, su estética, su evolución y su pérdida de masa, lo que fecunda la garantía de su perdurabilidad cultural.

Los pirineístas, pues, ascienden, escalan, recorren, cartografían, dibujan los Pirineos y escriben sobre ellos, pero además fijan el paisaje, y en particular los glaciares, a la cultura geográfica, montañera y montañesa. Es un proceso de descubrimiento cultural del paisaje glaciar que permanece en el tiempo, y se impone incluso a la persistencia de los propios glaciares. Un paisaje que se convierte en cultura, en imagen o recuerdo imperecedero, y no dejará de existir para quien observa los altos circos pirenaicos o cantábricos, a pesar de su desaparición.

CONCLUSIONES

Los glaciares de las montañas españolas, ceñidos a los más altos macizos de las cumbres pirenaicas, retroceden, parece que de modo inexorable, hacia su desaparición en unas décadas o durante este siglo. Lo que en el pasado reciente constituyó paisajes glaciares de notable extensión, tanto en el Pirineo como en Picos de Europa, hoy son masas de hielo relictas o glaciares de reducido tamaño que pierden masa y superficie rápidamente. Son, pues, paisajes de la alta montaña, del agua helada, que desaparecen. Su desaparición está ligada a procesos naturales, y su rapidez, casi violenta, sin duda al calentamiento climático antropogénico, de modo que la intervención humana en la atmósfera y la incapacidad para evitar la emisión de gases a corto y medio plazo generarán en el futuro inmediato una primera pérdida, natural, paisajística y cultural.

El retroceso de los glaciares se conoce con detalle en la actualidad, en gran parte debido al uso de técnicas geomáticas y geofísicas. Concretamente, el uso del georadar se ha extendido ampliamente con el fin de ayudar a establecer modelos geomorfológicos que incluyan la estructura y espesor del hielo, lo que permite proponer hipótesis sobre su evolución futura. La aplicación de estas técnicas en Picos de Europa y Pirineos ha permitido conocer la dinámica y estructura del helero del Jou Negro y de los glaciares La Patil y Ossoue, determinando espesores máximos de 12, 20 y 45 m, respectivamente.

Se estudia, pues, la pérdida de un medio, de un recurso y de un paisaje ligado al agua helada. Los glaciares pirenaicos y los heleros de Picos de Europa o Sierra Nevada, están inscritos en Espacios Naturales Protegidos, perteneciendo los pirenaicos a una figura creada para ello, los Monumentos Naturales de los Glaciares Pirenaicos. La paradoja de su desaparición puede llevar a su descatalogación como elementos a proteger, sin embargo, una visión científica, cultural y espacial, debe permitir que estos espacios, donde persisten hielo, nevés y ambientes de cambio, sean protegidos por sus elementos naturales, sus significados y su historia natural y humana reciente.

Los glaciares crean un paisaje de alto valor intrínseco, y cuando desaparecen dejan una huella física, tangible (circos, lagos, morrenas, depresiones, hielos enterrados), pero también una huella cultural, unas veces tangible (mapas, pinturas, relatos, estudios, datos) y otras intangible, profunda y perdurable en la memoria de un paisaje. Los exploradores, aventureros, caminantes, montañeros, artistas o científicos han llenado esta memoria del paisaje, de su descubrimiento y exploración, de su realidad física, en las alturas solitarias de la alta montaña peninsular –Pirineos, Picos de Europa, Sierra Nevada–, de modo que cuando los glaciares retroceden o desaparecen surge un territorio deglaciado con una profunda impronta cultural derivada de su historia reciente, de los paisajes glaciares que perduran en su «derrota».

BIBLIOGRAFÍA

- ARCONE, S. A. and KREUTZ, K., «GPR reflection profiles of Clark and Commonwealth Glaciers, Dry Valleys, Antarctica», *Annals of Glaciology*, 50 (51), 2009, pp. 121-129.
- BENN, D. I. and EVANS, D. J. A., *Glaciers and glaciations*, Londres, Hodder –Hachette UK, 2010.
- BERALDI, H., *Cent ans aux Pyrénées*, Pau, (1898-1904). Reedición de Les Amis du livre pyrénéen, Pau, 1977, 7 tomos.
- BRANDT, O.; LANGLEY K.; KOHLER, J. and HAMRAN, S.E., «Detection of buried ice and sediment layers in permafrost using multi-frequency Ground Penetrating Radar: A case examination on Svalbard», *Remote Sensing of Environment*, vol. 111, 2007, pp. 212-227.
- CHUECA, J.A., *Los glaciares pirenaicos aragoneses. Evolución. Fotografías 1880-1999*, Huesca, Boletín Glaciológico Aragonés, Diputación de Huesca, 2002.
- DARAUX, J.P., *Le voyage aux Pyrénées de James David Forbes en 1835*, Pau, Editions Cairn, 2000.
- DEL RÍO, L.M.; TEJADO, J. J.; DE SANJOSÉ, J. J.; ATKINSON, A.; SERRANO, E.; GONZÁLEZ, J. J. and FERNÁNDEZ, A., «Ice match structure and depth using GPR techniques: a first approach to the Jou Negro ice patch (Picos de Europa, Spain)» in *Proceedings: 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar IWAGPR'09*, May 27-29, 2009, Granada, Spain, pp. 278-284.
- DEL RÍO, M.; RICO, I.; SERRANO, E. and TEJADO, J. J., «GPR Prospection in the Ossoue Glacier (Pyrenees)», *14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, June 4-8, Shanghai, China, 2012.
- DEL RÍO, M.; RICO, I.; SERRANO, E. and TEJADO, J. J., «Applying GPR and Laser Scanner Techniques to Monitoring the Ossoue Glacier (Pyrenees)», *Journal of Environmental Engineering and Geophysics*, 2013 (in press).
- DYURGEROV, M. B. and MEIER, M. F., *Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot*, Colorado, Institute of Arctic and Alpine Research. Occasional Paper 58, 2005.
- ERHIN, *Datos sobre la nieve y los glaciares en las cordilleras españolas. El programa Erhin (1984-2008)*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008.
- ERHIN, *Los glaciares del Pirineo español*, Madrid, MAGRAMA, 2011.
- GAURIER, L., *Études glaciaires dans les Pyrénées françaises et espagnoles de 1900 a 1909*, Pau, Garet-Haristoy, 16, 1921.
- GONZÁLEZ TRUEBA, J. J., *La Pequeña Edad del Hielo en los Picos de Europa*, Santander, Servicio de Publicaciones, Universidad de Cantabria, Fundación Marcelino Botín, 2007.
- GONZÁLEZ TRUEBA, J. J. y SERRANO, E., *Naturaleza y Cultura en la Montaña Cantábrica*, Santander, Universidad de Cantabria, 2007.
- GONZÁLEZ TRUEBA, J. J.; MARTÍN MORENO, R.; MARTÍNEZ DE PISÓN, E. and SERRANO, E., «Little Ice Age glaciation and current glaciers in the Iberian Peninsula», *The Holocene* 18, 4, 2008, pp. 569-586.
- HAEBERLI, W., «Changing views of changing glaciers», in ORLOVE, B.; WIEGANGT, E. and LUCKMAN, B. H. (eds.), *Darkening Peaks: Glacier retreat, Science and Society*, Berkeley, University of California Press, 2007, pp. 23-32.
- KALTENBORN, B. P.; NELLEMAN, C. and VISTNES, I. I. (eds), *High mountain glaciers and climate change—Challenges to human livelihoods and adaptation*, United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. 2010.
- MALLADA, L., *Descripción física y geológica de la provincia de Huesca*. Memorias Comisión Mapa Geológico de España, 15, Madrid, 1878
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E. and ARENILLAS, M., «Los glaciares actuales del Pirineo español», en *La nieve en el Pirineo Español*, Madrid, MOPU, 1988, pp. 29-98.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E. y ÁLVARO, S., *El sentimiento de la Montaña. Doscientos años de soledad*, Madrid, Desnivel Ediciones, 2002.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E., «El paisaje de montaña. La formación de un cañón natural del paisajismo moderno», en ORTEGA, N. (ed.), *Naturaleza y Cultura del paisaje*, Madrid, UAM-Fundación Duques de Soria, 2004, pp. 53-121.
- MONNIER, S.; CAMERLYNCK, C. and REJIBA, F., «Ground-penetrating radar surveys on rock glaciers in the Vanoise Massif (Northern French Alps)», *Géomorphologie*, 2, 2009, pp. 129-140.
- OBERMAIER, H., *Estudio de los glaciares de los Picos de Europa*. Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales, serie geología, nº 9, Madrid, 1914.

- ORLOVE, B.; WIEGANDT, E. and LUCKMAN, B. H., «The place of glaciers in natural and cultural landscapes», in ORLOVE, B.; WIEGANDT, E. and LUCKMAN, B. H. (eds.), *Darkening Peaks. Glacier retreat, Science and Society*, Berkeley, University of California Press, 2007, pp. 3-22.
- PACKE, C., *A guide to the Pyrenees*, Londres, Longmans, Green and Co., 1867.
- PENCK, A., «Die Picos de Europa und das kantabrische Gebirge», *Geographische Zeitschrift Leipzig*, 1897, pp. 278-281.
- RAMOND DE CARBONNIERES, L., *Voyages au Mont-Perdu*, Belin, Paris. 1801 (edición en castellano, Madrid, OAPN, 2002).
- RENE, P., «Prospection radar au glacier d'Ossoue (Vignemale - Pyrénées). Détermination de l'épaisseur du glacier et de la topographie du lit rocheux», *Association Pyrénéenne de Glaciologie*, 24, Luchon, 2007.
- RENE, P., *Glaciers des Pyrénées. Le réchauffement climatique en images*, Luchon, Ed. Cairn, 2011.
- RICO, I.; SERRANO, E.; DEL RÍO, M.; SANJOSÉ, J. J. y TEJADO, J. J., «Estructura y dinámica actual del glaciar de La Paul (Pirineos): aplicación de Laser-Escaner terrestre y georadar», *Actas XIII Reunión Nacional de Geomorfología*, Santander, 2012, pp. 235-238.
- RUSSEL, H., *Souvenirs d'un montagnard*, Pau, 1888 (ed. en castellano, Huesca, Barrabés, 2002).
- SAINT SAUD, C. de., *Monographie des Picos de Europe*. Études et voyages. Nouvelle édition, Paris, Girard & Barréré, 1937.
- SANJOSÉ BLASCO, J. J.; ATKINSON GORDO, A.; SALVADOR FRANCH, F. and GÓMEZ ORTIZ, A., «Application de techniques in monitoring of the dynamic and mapping of the Veleta rock glacier (Sierra Nevada, Spain)», *Zeitschrift für Geomorphologie*, 52(1), 2007, pp. 79-89.
- SANJOSÉ BLASCO, J. J.; ATKINSON GORDO, A.; KAUFMANN, V.; GÓMEZ ORTIZ, A.; SALVADOR FRANCH, F.; SERRANO CAÑADAS, E. y GONZÁLEZ TRUEBA, J. J., «Técnicas geomáticas aplicadas al control de los glaciares rocosos. Comparación de los glaciares rocosos de Doesen (Alpes), Posets (Pirineos) y Corral del Veleta (Sierra Nevada)», *Cartográfica*, n° 85-86, 2010, pp. 35-45.
- SAULE-SORBÉ, H., *Pyrénées. Voyage par les images*, Pau, Editions de Faucompret, 1994.
- SAULE-SORBE, H., «El parque nacional de los Pirineos y el arte», en MARTÍNEZ DE PISÓN y N. ORTEGA (eds.), *La conservación del paisaje en los Parques nacionales*, Madrid, UAM-Fundación Duques de Soria, 2007, pp. 125-176.
- SCHRADER, F., «Sur l'étendue des glaciers des Pyrenees (1894)», en *Pyrénées*, Toulouse, Privat, 1936.
- SCHWAMBORN, G.; HEINZEL, J. and SCHIRRMESTER, L., «Internal characteristics of ice-marginal sediments deduced from georadar profiling and sediment properties (Brøgger Peninsula, Svalbard)», *Geomorphology*, 95, 2008, pp. 74-83.
- SERRANO, E.; SANJOSÉ, J. J. and AGUDO, C., «Rock glacier dynamics in a marginal periglacial high mountain environment: flow, movement (1991-2000) and structure of the Argualas rock glacier (Pyrenees)», *Geomorphology* 74, 2006, pp. 285-296.
- SERRANO, E.; SANJOSÉ, J. J. and GONZÁLEZ TRUEBA, J. J., «Rock glaciers dynamics in marginal periglacial environments», *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(11), 2010, pp. 1302-1314.
- SERRANO, E.; GONZÁLEZ-TRUEBA, J. J.; SANJOSÉ, J. J. and DEL RÍO, L. M., «Ice patch origin, evolution and dynamics in a temperate high mountain environment: the Jou Negro, Picos de Europa (NW Spain)», *Geografiska Annaler*, 93, 2011, pp. 57-70.
- SERRANO, E. y GONZÁLEZ TRUEBA, J. J., «Desarrollo de la cartografía de montaña en los Picos de Europa (1850-2000)», *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, 168, 2013, pp. 233-258.
- VV.AA., *Pirineístas franceses (1871-1895)*, Zaragoza, Gobierno de Aragón, 2000.
- ZAMORA, F., *Viaje por el Alto Aragón, noviembre del año 1794*, Huesca, Edición de León Buil, La Val de Onera, 1997.
- WGMS. *Glacier Mass Balance Bulletin*, N° 11 (2008-2009). *World Glacier Monitoring Survey*, Switzerland, University of Zurich, Department of Geography, 2011.
- ZUMBÜHL, H. J. and HOLZHAUSER, H., «Glaciers des Alpes du Petit Âge Glaciaire», *Les Alpes*, 64, 1988, pp. 130-322.