

ISSN: 0214-1744



EL GLACIAR DE LA MALADETA (PIRINEO CENTRAL ESPAÑOL): ANÁLISIS DE SU EVOLUCIÓN DESDE LA PEQUEÑA EDAD DEL HIELO Y DE SU RELACIÓN CON FACTORES CLIMÁTICOS

*The Maladeta glacier (Spanish central Pyrenees): an analysis of its evolution
since the Little Ice Age and its relationship with climatic factors*

J. Chueca Cía ⁽¹⁾, A. Julián Andrés ⁽²⁾, M. A. Saz Sánchez ⁽¹⁾, J. Creus Novau ⁽³⁾
e I. López Moreno ⁽⁴⁾

(1) *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Facultad de Ciencias Humanas y de la
Educación. Universidad de Zaragoza. Plaza de la Universidad, 3. 22002 Huesca.*

(2) *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Facultad de Filosofía y Letras.
Universidad de Zaragoza.*

(3) *Instituto Pirenaico de Ecología. CSIC. Jaca. Huesca.*

(4) *Instituto Pirenaico de Ecología. CSIC. Campus de Aula Dei. Zaragoza.*

E-mail: Jchueca@posta.unizar.es Fax: 974 239392

Resumen: Se analiza el proceso evolutivo del glaciar de la Maladeta (Macizo de la Maladeta-Aneto; Pirineo central español), desde el último máximo de la Pequeña Edad del Hielo hasta la actualidad. Partiendo de distintos elementos disponibles (restos morrénicos, documentos gráficos), se ha reconstruido y cartografiado su extensión en las nueve etapas para las que se cuenta con documentación de validez cronológica contrastada (1820-30; 1857; 1901-04; 1914-20; 1934-35; 1957; 1981; 1990; 1997-99). Esta información se compara con datos climáticos básicos (evolución de temperaturas y precipitaciones), reconstruidos en la zona para ese período mediante la utilización de técnicas dendroclimáticas y complementados por el análisis de registros instrumentales procedentes de varios observatorios surpirenaicos. Los resultados obtenidos permiten confirmar la estrecha relación entre los factores climáticos mencionados y la evolución del glaciar de la Maladeta, que ha pasado de tener una superficie de 152,3 ha en 1820-30, a tan sólo 54,5 ha (la suma de los dos cuerpos actuales) en 1997-99, el 35,7% de la inicial.

Palabras clave: Glaciar de la Maladeta, deglaciación, clima, Pirineo central español.

Abstract: The evolution of Maladeta glacier (Maladeta-Aneto massif; Spanish Central Pyrenees) is analyzed in this work since the last Little Ice Age maximum till today. Using different elements (morainic deposits, graphic documents), the extent of the glacier has been reconstructed and mapped for the nine stages in which reliable chronological data exist (1820-30; 1857; 1901-04; 1914-20; 1934-35; 1957; 1981; 1990; 1997-99). This information is compared with basic climatic data (temperature and precipitation evolution), reconstructed for the zone for that period by using dendroclimatic techniques and complemented by recent instrumental records of several south-pyrenean weather stations. The results thus obtained confirm the control of the above mentioned climatic factors in the evolution of Maladeta glacier, which has receded from an extent of 152.3 ha in 1820-30 to 54.5 ha in 1997-99, a 35.7% of the initial value.

Keywords: Maladeta glacier, deglaciation, climate, Spanish Central Pyrenees.



Chueca Cía, J., Julián Andrés, A., Saz Sánchez, M.A., Creus Novau, J. y López Moreno, I. (2003) El glaciar de la Maladeta (Pirineo central español): análisis de su evolución desde la Pequeña Edad del Hielo y de su relación con factores climáticos. *Rev. C. & G.*, 17 (3-4), 41-55.

1. Introducción

Como principal objetivo, este trabajo pretende mostrar la evolución del proceso de deglaciación experimentado por el glaciar de la Maladeta desde el último máximo de la Pequeña Edad del Hielo (PEH) hasta la actualidad, examinando a la par las relaciones entre ese proceso de deglaciación y la evolución climática registrada en la zona, partiendo para ello de reconstrucciones dendroclimáticas y de datos instrumentales. El glaciar de la Maladeta (actualmente fragmentado en dos cuerpos: glaciares Occidental y Oriental de la Maladeta) se localiza en el circo del mismo nombre, en el sector septentrional del macizo de la Maladeta-Aneto (Aneto, 3.404 m), en la cuenca alta del río Ésera, al norte de la provincia de Huesca (Fig. 1).

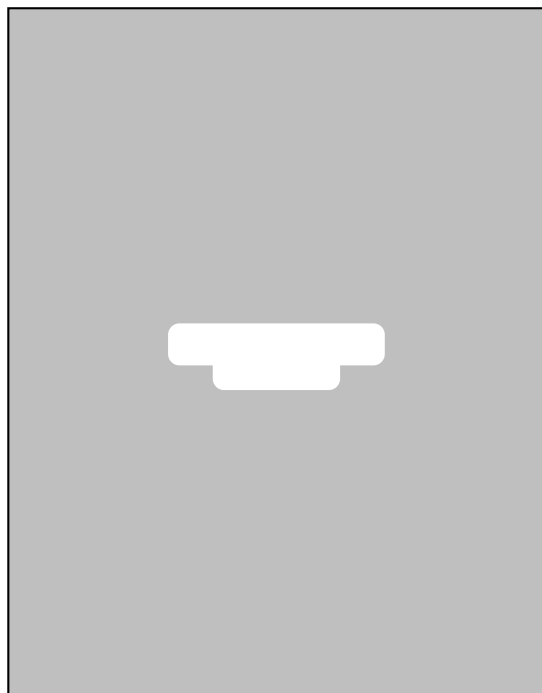


Figura 1. Localización del área de estudio y esquema geomorfológico del circo glaciar de la Maladeta. Leyenda: 1) Cordales de divisoria entre circos; 2) Divisorias menores; 3) Picos principales; 4) Hielo glaciar; 5) Cordones morrénicos y tills de la PEH; 6) Umbrales de origen glaciar; 7) Áreas con sustrato pulido y/o rocas aborregadas; 8) Mantos de derrubios; 9) Red fluvial

Figure 1. Location of study area and geomorphological map of Maladeta glacial cirque. Legend: 1) Glacial cirque limits; 2) Minor divides; 3) Main peaks; 4) Glaciers; 5) Little Ice Age till and morainic ridges; 6) Glacial thresholds; 7) Abraded surfaces with roches moutonnées; 8) Talus slopes; 9) Streams

Existe una relativamente abundante documentación gráfica (fotografías, grabados, cartografía y fotografías aéreas) que ilustra el estado del glaciar de la Maladeta en distintos momentos de su historia reciente. Esta documentación, una vez recopilada y analizada, nos ha servido para realizar la reconstrucción y cartografía de la extensión glaciar durante ocho etapas (1857; 1901-04; 1914-20; 1934-35; 1957; 1981; 1990; 1997-99), a las que hay que sumar una inicial, datada a partir de depósitos morrénicos, que representa el máximo alcanzado durante la Pulsación Final de la Pequeña Edad del Hielo (1820-30).

Esta información se contrasta y compara con datos climáticos básicos (evolución trimestral de temperaturas y precipitaciones), reconstruidos en la zona para ese período mediante técnicas dendroclimáticas y complementados por el análisis de registros instrumentales más recientes obtenidos a nivel regional para este sector surpirenaico. El interés de esta comparación es obvio, pues permite detectar la influencia de las oscilaciones del clima en la evolución dinámica del glaciar de la Maladeta, algo que se hace sobre todo evidente a la hora de explicar sus fases de retroceso o estabilización más marcadas.

El estudio se enmarca en una línea de investigación que ya ha permitido la reconstrucción del proceso de deglaciación en el glaciar de Coronas (Chueca *et al.*, 2001), ubicado en el mismo macizo de la Maladeta-Aneto, y se complementará con trabajos en macizos glaciados próximos para los que ya existe recopilado un importante volumen de documentación gráfica (Chueca y Julián, 2002).

2. Área de estudio: el glaciar de la Maladeta en el contexto del macizo de la Maladeta-Aneto

El complejo glaciar mejor conservado y de mayor extensión de los Pirineos se localiza en el valle del río Ésera o de Benasque (marginalmente incluye el valle de Salenques, que vierte a la cuenca de la Noguera Ribagorzana), dentro del macizo de la Maladeta-Aneto. El núcleo del macizo está construido en los materiales cristalinos del batolito de la Maladeta, cuerpo ígneo alargado en dirección E-O compuesto por masas homogéneas de granodiorita que, en la zona de crestas, suelen convertirse en granitos, más resistentes a la erosión. La dureza y masividad de estos materiales confiere al macizo su particular morfología, con elevaciones

generalizadas por encima de los tres mil metros (Aneto, 3.404 m; Pico Maldito, 3.350 m; Maladeta, 3.308 m; Tempestades, 3.290 m; Pico Russell, 3.205 m; Alba, 3.118 m) y fuertes energías de relieve entre los cresteríos cimeros y los fondos de los valles secundarios (Cregüña, Barrancs, Coronas, etc.), muchas veces labrados a partir de la densa red de fracturación que cruza el macizo.

La disposición morfoestructural del macizo (NO-SE) ha determinado, como en el caso de los macizos glaciados de Infiernos o Monte Perdido, una favorable orientación al NE para la mayoría de los aparatos glaciares hoy catalogados en el sector, entre ellos los de la Maladeta; tan sólo el glaciar-helero de Coronas y el helero-nevero de Cregüña se orientan al SO, en unas difíciles condiciones de conservación. En el macizo se localizan hoy (Chueca y Julián, 2002) los glaciares Occidental (6,1 ha) y Oriental de la Maladeta (48,4 ha; el segundo en dimensiones de todo el Pirineo), ambos resultado de la fragmentación en dos aparatos -a comienzos de los años noventa- del glaciar de la Maladeta; el glaciar del Aneto (90,4 ha; el mayor de la cadena); el glaciar de Barrancs (10,8 ha); el también recientemente fragmentado glaciar de Tempestades (con sus tres cuerpos: glaciar Occidental de Tempestades, 14,3 ha; helero Central de Tempestades, 7 ha; y helero Oriental de Tempestades, 2,1 ha); el pequeño glaciar-helero de Coronas (3 ha); los heleros Occidental de Salenques (6,5 ha) y Oriental de Salenques (5,6 ha); y los casi residuales heleros-neveros de Alba (1,1 ha) y Cregüña (1,9 ha).

La extensión actual del hielo en el total del macizo, 197,2 ha, supone tan sólo el 32% de la que se alcanzó durante la Pulsación Final de la PEH (616,2 ha). El glaciar de la Maladeta, en particular, que ocupaba en el máximo de la PEH una superficie de 152,3 ha (100%; el glaciar estaba unido, en aquel momento, al pequeño aparato desarrollado en el vecino circo de Alba), ha pasado, sumando los actuales dos fragmentos, a 54,5 ha, el 35,7% de esa extensión inicial. Pese a las marcadas pérdidas en extensión y espesor, ambos glaciares (aunque fundamentalmente el Oriental, de mayores dimensiones) todavía exhiben un apreciable dinamismo, con desarrollo puntual de grietas de tracción longitudinales y transversales de anchura y profundidad métricas. Los trabajos de Martínez y García (1994) y Martínez *et al.* (1997), en los que, mediante prospección geofísica, se analizaron los espesores de hielo en ambos cuerpos de hielo, arrojaron valores máximos ligeramente superiores a los 50 m en el caso del glaciar Oriental (en su sector

proximal más oriental, al pie del pico de la Maladeta) y a los 30 m en el del glaciar Occidental (en su sector proximal más occidental).

3. Evolución del glaciar de la Maladeta

El estudio de la evolución y la dinámica glaciar desde la Pequeña Edad del Hielo y hasta la actualidad, en el macizo de la Maladeta, ha sido abordado con mayor o menor nivel de precisión en varios trabajos previos de distintos autores (Martínez de Pisón y Arenillas, 1988; Copons y Bordonau, 1994; Lampre, 1994, 1996; Chueca y Julián, 1996). Análisis más detallados, en la línea del que aquí se incluye, son los realizados por Copons y Bordonau (1997) para el propio glaciar de la Maladeta, y el llevado a cabo por Chueca *et al.* (2001) para el glaciar de Coronas.

A excepción de la primera de las etapas estudiadas, datada a partir de los materiales morrénicos de la Pequeña Edad del Hielo presentes en el circo (Chueca y Julián, 1996), se han examinado y/o utilizado en la cartografía de la extensión del hielo -siempre que presentaran fiabilidad suficiente, como luego veremos- iconografía (grabados y dibujos de época), mapas topográficos, fotografías aéreas y fotografías convencionales: 1) iconografía (grabados y dibujos de época): aunque no se han empleado directamente en la cartografía de la extensión glaciar, sí se han utilizado como apoyo de otros documentos; 2) mapas topográficos: existen para la zona distintas ediciones españolas y francesas; por su escala, la fiabilidad en lo que hace a la representación del hielo glaciar es muy baja, por lo que se ha prescindido de su utilización final. La mayoría de estos documentos topográficos cubren además únicamente la segunda mitad del siglo XX, etapa en la que abundan otro tipo de fuentes, por lo que este hecho no ha supuesto un problema grave en la reconstrucción efectuada (dos excepciones notables son los levantamientos cartográficos efectuados por Charles Packe y Franz Schrader en el macizo en torno a 1867 y 1890, respectivamente, que se comentarán más adelante); 3) fotografías aéreas: su fiabilidad es manifiesta, aunque su utilidad para nuestros propósitos se ve reducida si en el momento de la toma de los fotogramas la innivación era importante, enmascarando la extensión real de los cuerpos glaciares. En este sentido, los fotogramas del vuelo americano de 1957

son los únicos que se han utilizado sin reservas; vuelos posteriores, como los de 1981 ó 1997, de mayor detalle pero con mayor presencia de la cobertera nival, tan sólo se han empleado como apoyo a las interpretaciones del cuarto tipo de documentos; 4) fotografías convencionales: si sus encuadres son significativos (abarcaban gran parte del cuerpo glaciar y distintos elementos de la caja glaciar utilizables como referencia en los procesos de restitución; son comparables con tomas de otros años), y se realizaron en época estival, indudablemente constituyen uno de los documentos más útiles. El único problema grave está ligado al correcto establecimiento de la fecha de su toma, problema que se acentúa en los documentos más antiguos. Las fotografías utilizadas en nuestro estudio son, por tanto, sólo aquellas para las que contamos con una cronología contrastada y fiable y cumplen los dos requisitos mencionados (en caso contrario se utilizan como simples documentos de apoyo).

Examinaremos a continuación los rasgos básicos del glaciar de la Maladeta en cada una de las nueve etapas que hemos analizado.

3.1. Situación en 1820-30

La cronología de la primera etapa considerada se obtuvo, para la vertiente norte del macizo de la Maladeta-Aneto, por medio de la utilización de técnicas liquenométricas y otros métodos de datación relativa, con los que se dataron los arcos morrénicos desarrollados en los circos del sector (Chueca y Julián, 1996). La edad de construcción de estos arcos (c. 1820-30) se corresponde con la última de las pulsaciones frías importantes que tuvieron lugar durante la Pequeña Edad del Hielo en la cadena pirenaica (un análisis de la repercusión global de esta fase climática, en términos glaciológicos, en el contexto pirenaico meridional, puede encontrarse en Julián y Chueca, 1998).

Esta etapa, representada por el potente y bien conservado cordón morrénico que se dispone entre los 2.500-2.800 m s.n.m. en el tramo distal del circo de la Maladeta (Figs. 1 y 2), indica el momento de inicio del proceso de deglaciación que ha ido experimentando el glaciar de la Maladeta desde entonces y hasta la fecha (de hecho, en esta fase, el

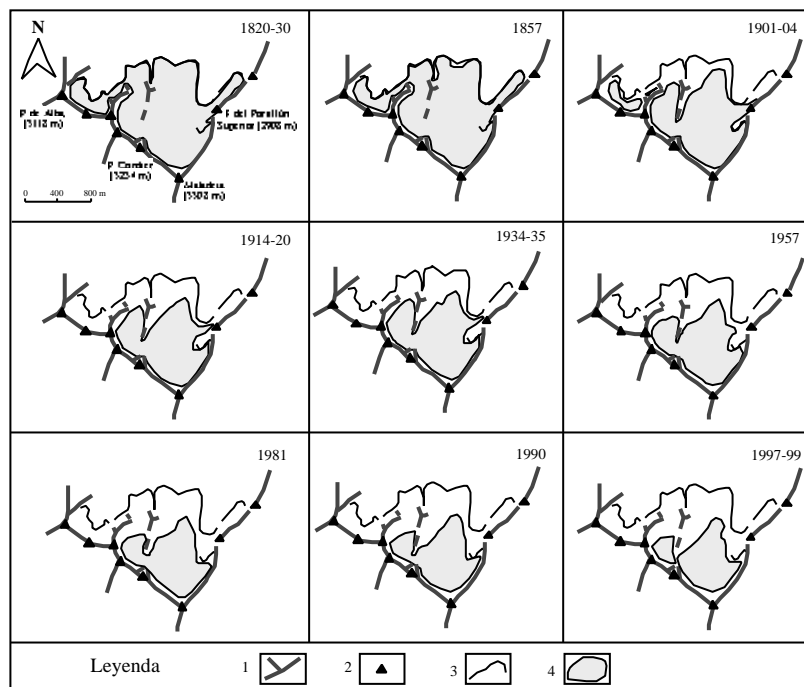
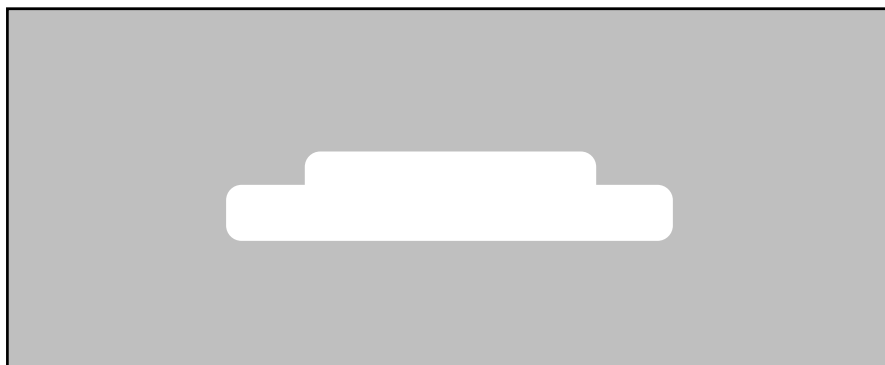


Figura 2. Cartografía de la evolución del glaciar de la Maladeta en las nueve etapas analizadas. Leyenda: 1) Cordales de divisoria entre circos; 2) Picos principales; 3) Cordones morrénicos de la PEH; 4) Hielo glaciar.

Figure 2. Cartography of Maladeta glacier evolution through the nine analyzed stages. Legend: 1) Glacial cirque limits; 2) Main peaks; 3) Little Ice Age morainic ridges; 4) Glaciers.

Tabla 1. Características básicas del glaciar de la Madaleta durante las etapas analizadas.
 Table 1. Basic characteristics of Madaleta glacier in the analyzed stages.



glaciar estaba, aunque de forma marginal, literalmente unido al pequeño cuerpo de hielo desarrollado en el circo de Alba, situado al oeste del de la Madaleta). La extensión del glaciar en aquel momento -incluyendo el tramo que pertenece al citado circo de Alba y su prolongación hacia el de la Madaleta bajo el Pico Mir- alcanzaba las 152,3 ha (ésta y las sucesivas cifras de dimensiones del glaciar que iremos mencionando se corresponden con los valores de superficie horizontal reducida), con una longitud de 1.560 m, y unas cotas máxima y mínima de presencia de hielo de 3.220 y 2.510 m s.n.m., respectivamente; la línea de equilibrio glaciar (ELA), calculada para ese momento por el método de Kurowski, se situaba en los 2.840 m (Tabla 1). Un documento iconográfico interesante de esta etapa es el dibujo de la vertiente septentrional del macizo realizado por Friedrich Parrot en

1823 e incluido en su trabajo *Reise in den Pyrenäen* (Parrot, 1823); pese a lo grosero del detalle del mismo, Parrot muestra el glaciar de la Madaleta en una fase de máximo desarrollo, perfectamente relacionable con la pulsación final de la PEH que estamos mencionando.

3.2. Situación en 1857

Para esta etapa, contamos con un primer documento fotográfico fiable de indudable calidad (obtenido por el fotógrafo francés Aimé Civiale) (Fig. 3). En ese momento, el glaciar de la Madaleta apenas evidenciaba retroceso en extensión respecto al máximo de la etapa anterior (tasa de pérdida de superficie de -0,11 ha/año); el cuerpo del glaciar había perdido contacto con la morrena únicamente en algunos tramos muy puntuales de su extremo fronto-distal (Fig. 2). Su extensión era de 148,5 ha, con una longitud cercana a los 1.540 m, y una localización de sus cotas altitudinales máxima y mínima y de su ELA similares a las de la etapa anterior (Tabla 1). Este documento se complementa, por una parte, con una serie de grabados del acuarelista y litógrafo Victor Petit, llevados a cabo en torno a 1850-60 para la *Guide Joanne* (Joanne, 1862) y/o para su venta como láminas turísticas, que muestran todavía el gran desarrollo del glaciar de la Madaleta en esos momentos (particularmente interesante es el detalle con el que se recoge la existencia de la pequeña lengua de hielo que recorre el pie de la cresta de los Portillones, en la porción más oriental del glaciar). Por otra, con la cartografía del macizo



Figura 3. Panorámica del glaciar de la Madaleta desde el Puerto de Benasque (Autor: A. Civiale; Fecha: 1857).

Figure 3. Panoramic view of Madaleta glacier from Puerto de Benasque (Author: A. Civiale; Date: 1857).

de la Maladeta-Aneto efectuada por Charles Packe para su trabajo *A guide to Pyrenees* (Packe, 1867); en ella (realizada con el primitivo método de *hachures* de representación del relieve), se cartografiaban las principales masas de hielo del macizo y, entre ellas, el glaciar de la Maladeta con una extensión y morfología que, pese a su imprecisión, se corresponden con las que son visibles en la fotografía de Civiale. Por último, una fotografía de E. Trutat, datada en 1876 y recogida en el trabajo ya citado de Copons y Bordonau (1997), refleja en el glaciar el comienzo del retroceso en superficie que quedará ya muy evidenciado en la etapa siguiente.

3.3. Situación en 1901-04

Para estas fechas, contamos con dos documentos fotográficos de calidad apreciable y complementarios: 1) la fotografía (comercializada como tarjeta postal) de Julio Soler Santaló de 1901 en la que se muestra el sector centro-occidental del glaciar de la Maladeta (Fig. 4); y 2) la también tarjeta postal de Louis Le Bondidier de 1904 que, desde el Puerto de Benasque, exhibe una panorámica completa del glaciar avanzado el verano. En esos momentos, la extensión del cuerpo de hielo muestra una disminución notable: con una tasa de pérdida de superficie de $-1,03$ ha/año desde la etapa anterior, alcanza una cifra de $100,7$ ha ($66,1\%$ de la inicial) (Fig. 2). Las cotas de localización altitudinal máxima y mínima evolucionan obviamente de forma regresiva, pasando a ser, respectivamente de 3.200 y 2.640 m s.n.m., mientras que la longitud máxima, con 1.540 m, sigue siendo muy similar a la del máximo. La línea de equilibrio glaciar se emplaza en esta fase a 2.980 m s.n.m. (Tabla 1). Aunque ya hemos analizado y constatado en otros trabajos (Chueca *et al.*, 2001; Chueca y Julián, 2002) la baja fiabilidad de las estimaciones clásicas de extensión glaciar pirenaica realizadas por el glaciólogo francés Schrader a finales del siglo XIX (Schrader, 1936), que tienden a sobredimensionar esos valores, un documento de apoyo que hemos manejado es la cartografía topográfica del macizo (a escala sinóptica) efectuada por este autor hacia 1890; en ella se recoge una morfología del glaciar de la Maladeta que se asemeja a la observable en las fotografías de Soler Santaló y Le Bondidier, tomadas aproximadamente una década después.



Figura 4. Panorámica del sector centro-occidental del glaciar de la Maladeta (Autor: J. Soler Santaló; Fecha: 1901).

Figure 4. Panoramic view of Maladeta glacier central-western sector (Author: J. Soler Santaló; Date: 1901).

3.4. Situación en 1914-20

En esta etapa, son de nuevo dos los documentos fotográficos aprovechables que hemos manejado: 1) en 1914 la colección de fotografías *Obras del Salto de El Run*, de autor anónimo y que comercializó como tarjetas postales la compañía *Catalana de Gas y Electricidad*, en la que se muestran distintas panorámicas del entorno del macizo de la Maladeta-Aneto y, en particular, algunas interesantes del glaciar de la Maladeta realizadas desde las cercanías del Puerto de Benasque avanzado el mes de septiembre de ese año; 2) en septiembre de 1920, una fotografía del mismo glaciar de C. Lana Serrate, obtenida ésta desde el Puerto de la Picada, que apareció publicada años más tarde junto a otras del autor en forma de opúsculo bajo el título de *Rutas del Pirineo español*. El glaciar de la Maladeta, durante las dos décadas transcurridas, mantuvo una tasa de pérdida de superficie elevada aunque algo ralentizada ($-0,55$ ha/año), situándose en $92,9$ ha ($60,9\%$ de la inicial); el retroceso en longitud se remarca, quedando este parámetro en 1.340 m, con cotas altitudinales máximas y mínimas de 3.200 y 2.660 m s.n.m., respectivamente. La ELA se ubicaba en esta etapa a 3.005 m s.n.m. (Fig. 2; Tabla 1).

3.5. Situación en 1934-35

En esta fase hemos utilizado las fotografías del glaciar de la Maladeta de dos autores: 1) las realizadas por Ricardo Compairé en 1934, de gran calidad pero nunca comercializadas ni publicadas, y que se conservan en los archivos de la Fototeca de la



Figura 5. Panorámica del glaciar de la Madaleta desde el Puerto de Benasque (Autor: R. Compairé; Fecha: 1934).

Figure 5. Panoramic view of Maladeta glacier from Puerto de Benasque (Author: R. Compairé; Date: 1934).

Diputación Provincial de Huesca (Fig. 5) (Chueca y Julián, 2002); 2) la de 1935, obtenida desde el Puerto de Benasque, por el geógrafo L. García Sáinz, publicada en 1940 en la revista *Estudios Geográficos* en uno de sus trabajos de investigación centrado en el glaciario del macizo. Documentos fotográficos de apoyo datados en 1930 son las aportaciones de Albert Oliveras (publicadas algunas en la obra de Escudier, 1972), en las que se muestra con detalle el estado del hielo en la zona proximal del glaciar, cerca de la rimaya de contacto con la caja glaciar. Entre esta etapa y la anterior, el glaciar de la Madaleta pierde superficie a un ritmo menor (-0,18 ha/año), quedando ésta en 89,7 ha (58,8% de la inicial). Su longitud era de 1.300 m y sus cotas de localización altitudinal de 3.200 y 2.670 m s.n.m., emplazándose entonces su línea de equilibrio a 3.010 m de altura (Fig. 2; Tabla 1).

3.6. Situación en 1957

La fotointerpretación del vuelo americano de este año (agosto de 1957; escala aprox. 1:30.000; blanco y negro), permite también realizar una interpretación adecuada de la extensión del glaciar de la Madaleta en ese momento (Fig. 2). La tasa de retroceso evidenciada en la fase anterior se hace, algo más de veinte años después, mucho más marcada (-0,68 ha/año); el cuerpo de hielo tiene ahora una extensión de 74,2 ha (el 48,7% de la inicial), con una longitud máxima de unos 1.220 m y cotas máxima y mínima de 3.200 y 2.700 m s.n.m., respectivamente; la línea de equilibrio

glaciar se sitúa en esta fase en torno a los 3.030 m s.n.m. (Tabla 1). Un documento de apoyo, en el que el glaciar de la Madaleta aparece con ligera innivación, es la fotografía efectuada desde el Puerto de Benasque por Henri Baudrimont en 1965, y publicada años más tarde (1988) en la revista francesa *Pyrénées*: en ella se aprecia una extensión del cuerpo de hielo prácticamente similar a la descrita ocho años antes, situación que encaja con la dinámica regresiva ralentizada que se evidencia entre 1957 y 1981.

3.7. Situación en 1981

Para esta etapa contamos con la información proporcionada por el vuelo Pirineos-Sur (septiembre de 1981; escala aprox. 1:25.000; blanco y negro), con presencia sin embargo importante de la nieve en la parte alta de los circos del macizo; un documento fotográfico de edad casi similar (1978), de E. Reula, conservado en la Fototeca de la Diputación Provincial de Huesca (Chueca y Julián, 2002), sirve para ayudar a reconstruir el aspecto del glaciar de la Madaleta en esta fase (Fig. 2). El hecho más llamativo es el marcado atenuamiento experimentado en las pautas de retroceso de superficie y espesor que hasta ese momento se habían venido registrando en el glaciar, sin precedentes desde mediados del siglo XIX: así, el deterioro cuantificado en el cuerpo de hielo desde 1957, durante un lapso de tiempo de algo más de dos décadas, se reduce a una tasa de pérdida de superficie de -0,13 ha/año, la segunda cifra más baja de todo el período considerado. El cuerpo principal pierde apenas 3,3 ha de extensión, quedándose en 70,9 ha (46,5% de la superficie inicial); las cotas máxima y mínima, la longitud y la altitud de localización de la ELA no registran apenas variaciones significativas, manteniéndose casi en los mismos valores de la etapa anterior (Tabla 1).

3.8. Situación en 1990

A partir del comienzo de los años noventa, contamos ya con abundantes documentos fotográficos que atestiguan el retroceso en espesor, longitud y extensión del glaciar de la Madaleta. En la reconstrucción, hemos utilizado fotografías de esta fecha de nuestra colección particular. El glaciar presenta, en los diez años transcurridos desde la etapa anterior, los valores más altos de tasa de pérdida de superficie (-1,03 ha/año), prácticamente un orden de magnitud superiores a los de la fase previa y



Figura 6. Detalle del desgajamiento del glaciar de la Maladeta en los dos cuerpos actuales: a la derecha el glaciar Occidental y a la izquierda el glaciar Oriental (Autor: J. Chueca; Fecha: 1995).
Figure 6. Detailed view of the Maladeta glacier separation into the two present ice bodies: right, Maladeta Occidental glacier; left, Maladeta Oriental glacier (Author: J. Chueca; Date: 1995).



Figura 7. Vista del glaciar Occidental de la Maladeta (Autor: J. Camins; Fecha: 1992).
Figure 7. View of Maladeta Occidental glacier (Author: J. Camins; Date: 1992).

similares a los ya mencionados para el período 1857-1901/04, al comienzo del proceso de deglaciación tras la Pulsación Final de la PEH. La separación entre los actuales dos fragmentos (glaciares Occidental y Oriental de la Maladeta) todavía no llega a constatarse (Fig. 2). La extensión del cuerpo de hielo en este momento era de 61,6 ha (el 40,4% de la inicial), con una longitud máxima de 1.100 m y cotas máxima y mínima emplazadas a 3.200 y 2.730 m s.n.m., respectivamente; la línea de equilibrio glaciar ascendía varias decenas de metros, hasta situarse en los 3.090 m (Tabla 1).

3.9. Situación en 1997-99

La última de las etapas analizadas en nuestro trabajo muestra la situación del glaciar de la Maladeta prácticamente en la actualidad. Hemos contado con los datos aportados por el vuelo fotogramétrico encargado por el Gobierno de Aragón y llevado a cabo entre 1997-2000 (vuelo D.G.A.; escala aprox. 1:20.000; color), complementados por las fotografías obtenidas por el cuerpo de voluntarios que colabora en las sucesivas campañas glaciológicas dentro del proyecto de *Estudio de la dinámica de los glaciares del Pirineo aragonés* (Chueca et al., 2000; Julián et al., 2001). Nueve años después de la fase que acabamos de mencionar, el glaciar de la Maladeta se presenta definitivamente desgajado en dos cuerpos (Figs. 2, 6 y 7), los glaciares Occidental y Oriental de la Maladeta. El glaciar Occidental, el de menores dimensiones, posee 6,1 ha de superficie, y el Oriental,

48,4 ha; la suma de ambos, 54,5 ha, supone el 35,7% de la superficie inicial del glaciar. La tasa de pérdida de superficie en la década de los noventa, aunque algo menos marcada que en la década anterior, sigue siendo una de las elevadas de todo el período estudiado: -0,88 ha/año. El glaciar Occidental presenta una longitud de 380 m y cotas máxima y mínima de presencia de hielo situadas a 3.180 y 2.910 m s.n.m., respectivamente. El glaciar Oriental tiene una longitud máxima de 1.030 m, su altura máxima y mínima es de 3.200 y 2.740 m s.n.m., y la línea de equilibrio glaciar se ubica ahora a 3.095 m s.n.m. (Fig. 8; Tabla 1).



Figura 8. Panorámica de los glaciares de la Maladeta desde el Puerto de Benasque (Autor: J. Camins; Fecha: 1999).
Figure 8. Panoramic view of Maladeta glaciers from Puerto de Benasque (Author: J. Camins; Date: 1999).

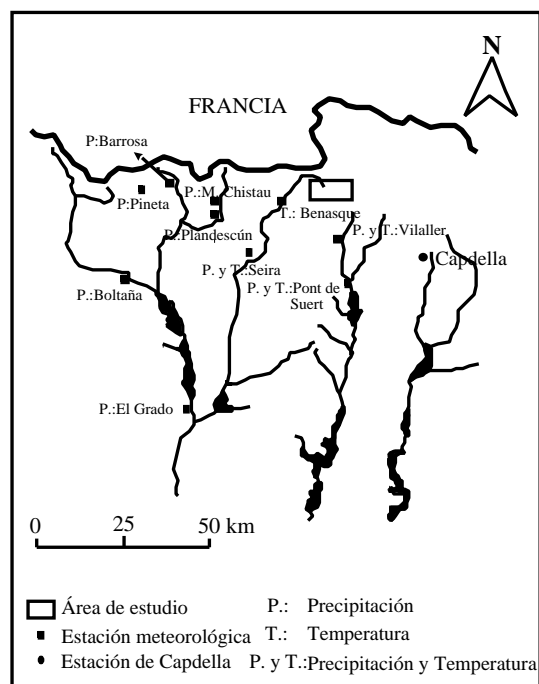


Figura 9. Localización del observatorio de Capdella y de los observatorios con los que se ha construido la serie regional instrumental. Figure 9. Location of Capdella's weather station and the observatories from which the instrumental regional series has been obtained.

4. Factores climáticos

4.1. Datos utilizados

Los datos climáticos utilizados en nuestro estudio proceden, como ya se ha apuntado previamente, de dos grandes fuentes de información: 1) por un lado se ha trabajado con la reconstrucción de los valores trimestrales y anuales de las temperaturas y precipitaciones del observatorio pirenaico de Capdella obtenidas mediante técnicas dendroclimáticas, unos datos que en el caso de algunas variables alcanzan hasta el siglo XII, si bien en este trabajo se han utilizado los obtenidos a partir del año 1800. El observatorio de Capdella se sitúa a aproximadamente 35 km al este del glaciar de la Madaleta, a 1.485 m s.n.m., dentro de la cuenca del río Flamisell, afluente del Noguera Pallaresa (Fig. 9); 2) por otro lado, se han utilizado los valores instrumentales de varios observatorios de la zona surpirenaica oriental aragonesa, situados a distancias de entre 20-50 km del macizo de la

Maladeta-Aneto (Fig. 9) y con al menos veinticinco años de registros, agrupándose esa información en una única serie regional representativa de la evolución reciente del clima en la zona analizada. Obviamente se trata de una serie de menor extensión temporal que la dendroclimática (cubre el periodo 1941-1999) pero interesante como complemento de aquella.

Para realizar la reconstrucción del clima de los últimos siglos en Capdella se utilizaron dendrocronologías construidas a partir de las muestras extraídas del crecimiento radial de los árboles seleccionados en varios puntos del noreste español. Los crecimientos anuales se midieron con una precisión de 0,01 mm y posteriormente se dataron y sincronizaron con objeto de insertar los anillos ausentes o eliminar los falsos. Esas series de crecimiento, tras ser estandarizadas y transformadas en índices, pueden agruparse para formar una cronología local independientemente de la edad de cada árbol. Cualquier reconstrucción de una variable climática requiere un mínimo de estas cronologías (el número mínimo aconsejable es de 5 ó 6), aunque a mayor número de cronologías son más las variables que pueden ser reconstruidas a la vez que aumenta la fiabilidad de la reconstrucción.

El conjunto de dendrocronologías utilizadas han sido las de Aigües Tortes (*Pinus uncinata* R.) en Lérida, Pinobajo (*Pinus sylvestris* L.), Trapa (*Pinus sylvestris* L.) e Ibonciecho (*Pinus sylvestris* L.) en Huesca, además de otras más distantes pero que mostraban una elevada sincronización en la señal de media y alta frecuencia: Larra (*Pinus uncinata* R.) en Navarra, y las de Peñarroya (*Pinus uncinata* R.) y Bellena (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii*) en Teruel. La metodología tradicional utilizada en este tipo de reconstrucciones del clima puede consultarse en la amplia bibliografía existente (Fritts, 1990, 1991; Cook y Kairiukstis, 1990; Guiot, 1990; etc.). Con ella se realizó un primer intento de reconstrucción en esta misma zona y observatorio que permitió conocer la evolución de la temperatura de mayo desde el año 1302 (Creus, 1991). En este caso se utilizó la función respuesta desde una sola cronología como método para seleccionar las variables climáticas reconstruibles, lo que difícilmente permite encontrar más de una o dos variables significativas. Sin embargo, recientemente se han realizado modificaciones en esta metodología (Fernández y Manrique, 1997) de

manera que es posible utilizar conjuntamente un mayor número de cronologías siempre que tengan una elevada sincronización entre sí, aun en distancias espaciales importantes. Al intervenir un mayor número de predictores en el proceso (cronologías), la señal climática reconstruible se incrementa de manera importante al depender de la que aportan conjuntamente.

Para la obtención de las series regionales de precipitación y temperatura en el entorno del macizo de la Maladeta-Aneto a partir de información instrumental se han utilizado datos climáticos de estaciones meteorológicas situadas en las cuencas de los ríos Cinca, Ésera y Noguera Ribagorzana. En concreto, para las series de precipitación se utilizaron los datos de los observatorios de El Grado, Boltaña, Pineta, Barrosa, Seira, Plandescún, Molino de Chistau, Pont de Suert y Vilaller. Para las series de temperatura, se utilizaron los de Benasque, Seira, Villanova, Pont de Suert y Vilaller.

Todas las series instrumentales utilizadas disponen de al menos veinte años de registros dentro del periodo de referencia utilizado (1951-1980). Los datos ausentes han sido rellenados por regresión lineal a partir de las estaciones que presentaban mejor correlación. Para la obtención de la serie regional los datos originales fueron transformados en valores estandarizados en función de la media y la desviación estándar del periodo de referencia (1951-1980) y tras comprobar la existencia de una buena correlación entre las estaciones utilizadas ($r^2 > 0,7$ en el caso de la temperatura y $r^2 > 0,6$ para la precipitación), se promediaron esos valores estandarizados, obteniéndose de esta forma una serie representativa de la evolución de las temperaturas y las precipitaciones en la zona de estudio.

Los datos analizados se han agrupado en ambos casos en valores medios anuales y en valores medios trimestrales de temperaturas y precipitaciones. Atendiendo a sus repercusiones en el balance de masa glaciar, los trimestres considerados en el estudio han sido diferentes: 1) tercer trimestre (verano), para las temperaturas; y 2) primer trimestre (invierno) para las precipitaciones. En el caso de las temperaturas, el tercer trimestre (meses de julio, agosto y septiembre) es significativo por cuanto marca las condiciones de fusión-ablación en el balance de masa glaciar. Respecto a las precipitaciones, el primer trimestre (enero, febrero y marzo) representa la etapa en la que se producen

mayoritariamente las precipitaciones nivales que alimentan el sistema.

4.2. Análisis de la evolución del glaciar de la Maladeta en relación con los factores climáticos

A continuación examinaremos la relación existente entre la tendencia evolutiva mostrada por el glaciar de la Maladeta a lo largo de los últimos dos siglos, desde el último máximo de la PEH hasta la actualidad, y la evolución de las variables climáticas consideradas. Utilizaremos para ello los datos térmicos y pluviométricos reconstruidos en Capdella, observatorio situado en una posición más oriental que el macizo de la Maladeta-Aneto pero cuya señal climática ofrece un elevado grado de correspondencia con la serie regional calculada a partir de información instrumental para la zona de estudio. En las gráficas de la figura 10 se observa cómo la pauta evolutiva que muestran las series dendroclimáticas y las instrumentales es muy similar, con coeficientes de correlación entre las distintas variables consideradas (Tabla 2) elevados y en todos los casos significativos ($\alpha=0.01$).

En este sentido ha de tenerse en cuenta que si bien las reconstrucciones dendroclimáticas necesitan información instrumental de un observatorio determinado para la calibración con las cronologías, la disposición geográfica de éstas y su propia naturaleza, hacen que la información dendroclimática final reconstruida ofrezca una imagen de la evolución del clima de espacios geográficos más amplios que los observatorios instrumentales tradicionales. Las reconstrucciones captan en mayor medida una señal macroclimática que, aunque carece de la total precisión cuantitativa de la instrumental, señala de forma precisa a una escala temporal plurisecular las variaciones de las variables consideradas.

La elevada correlación de la reconstrucción con la información instrumental y esa consideración espacial macroclimática de la información dendroclimática, hacen que podamos utilizar las series reconstruidas como representativas de los factores climáticos de la zona de estudio que inciden sobre la evolución del glaciar. Con objeto de reducir la variabilidad natural de las series climáticas y facilitar la detección de los periodos anómalos, las series dendroclimáticas de las variables consideradas se han filtrado mediante media móvil de 5 años, representándose gráficamente en la figura 11.

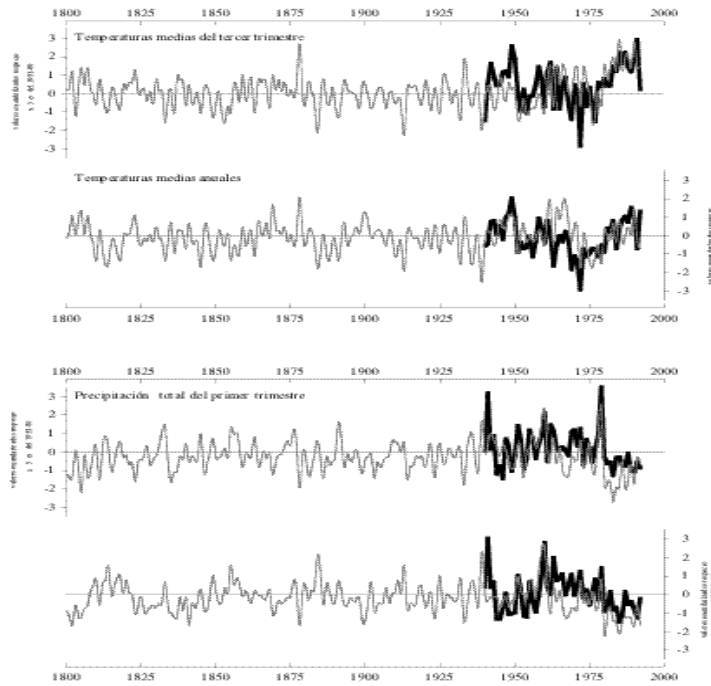


Figura 10. Información climática reconstruida en el observatorio de Capdella (línea gris) y serie regional obtenida a partir de información instrumental para el ámbito del macizo Maladeta-Aneto (línea negra).
 Figure 10. Climatic information reconstructed in Capdella's weather station (gray line) and regional series obtained from instrumental information for the Maladeta-Aneto massif (black line).

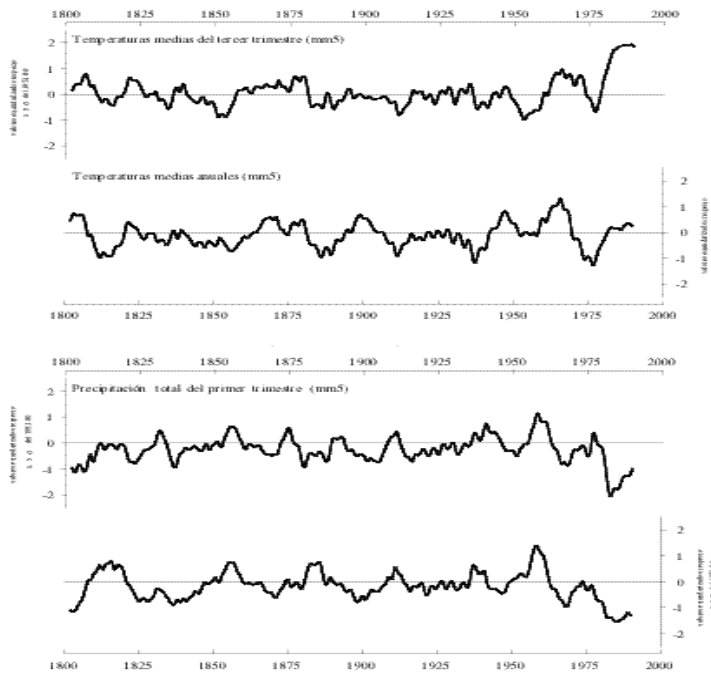


Figura 11. Información climática reconstruida en el observatorio de Capdella filtrada con media móvil de 5 años.
 Figure 11. Climatic information reconstructed in Capdella's weather station filtered with a 5 year moving average.

Tabla 2. Coeficientes de correlación obtenidos entre las series dendroclimáticas de Capdella y las regionales obtenidas a partir de información instrumental. Leyenda: TT3: temperatura media del tercer trimestre; TTA: temperatura media anual; PT1: precipitación total del primer trimestre; PTA: precipitación total anual. *Table 2. Correlation coefficients obtained between Capdella's dendroclimatic series and the regional ones. Legend: TT3: average temperature of the third trimester; TTA: annual mean temperature; PT1: total precipitation of the first trimester; PTA: annual total precipitation.*

	TT3	TTA	PT1	PTA
	Pirineos	Pirineos	Pirineos	Pirineos
TT3 Capdella	0,60	#	#	#
TTA Capdella	#	0,44	#	#
PT1 Capdella	#	#	0,65	#
PTA Capdella	#	#	#	0,53

4.2.1. Características climáticas hasta 1820-30

La primera de las etapas consideradas llega hasta la década de los años veinte del siglo XIX, momento en el que, como se ha señalado en el apartado 3.1, el glaciar de la Maladeta alcanza su máxima extensión superficial en la última pulsación fría de la PEH, previa al proceso de deglaciación iniciado a partir de entonces. En la década anterior (1810-20) las temperaturas de verano y las anuales son bajas en relación a los valores promedio del período de referencia 1951-1980, con diferencias de 0,25°C y 0,35°C respectivamente, mientras que, por el contrario, las precipitaciones superan las registradas en el período de referencia en el caso de los totales anuales y no muestran diferencias significativas en el caso de las precipitaciones del primer trimestre, condiciones en cualquier caso favorables para el balance de masa glaciar. Trabajos anteriores realizados sobre los datos reconstruidos en este observatorio pirenaico (Saz y Creus, 2001; Saz, 2002) señalan además una tendencia descendente significativa de las temperaturas de invierno y de las anuales desde mediados del siglo XVIII hasta estas primeras décadas del XIX.

4.2.2. Características climáticas del período 1820-30/1857

El glaciar de la Maladeta no ofrece durante esta etapa signos de retroceso significativo respecto al máximo de la etapa anterior. Tanto las temperaturas de verano como las anuales ofrecen valores bajos en relación al período de referencia, con intervalos, como el 1842-1855, en el que las temperaturas del

trimestre julio-agosto-septiembre quedan una media de 0,4°C por debajo del umbral de referencia. El cuerpo de hielo, sin embargo, no muestra aumento respecto a su situación en 1820-30, perdiendo incluso contacto con la morrena en algunos tramos, aunque muy puntuales, algo que podría estar relacionado con las escasas precipitaciones detectadas en este período, al menos hasta el comienzo de la década de los cincuenta, por debajo en general de las del período de referencia.

4.2.3. Características climáticas del período 1857/1901

En esta etapa se produce el primer período de deglaciación acelerada del glaciar de la Maladeta, con una tasa anual de pérdida de superficie similar a la que se registrará en la década de los años noventa del siglo XX. Los factores climáticos indican para esta fase temperaturas elevadas hasta la década de los años ochenta, con unas medias de verano entre 1859 y 1878 0,3°C por encima de la media del período 1951-1980 y una media anual en ese mismo tramo 0,15°C sobre ese umbral. Este momento cálido coincide además con unas precipitaciones del primer trimestre y anuales bajas en relación a los totales medios del período de referencia, condiciones ambas desfavorables para el balance de masa glaciar, con diferencias en el caso del primer trimestre en los intervalos 1859-1872 y 1878-1883 del 10,25% y 26,5% y de un 5,5% en el intervalo 1861-1875 en el caso de las anuales. Posteriormente, en las décadas de los años ochenta y noventa del siglo XIX las temperaturas son bajas o en torno a la media del período de referencia, si bien las precipitaciones ofrecen todavía valores reducidos, en especial las de invierno, que entre 1878 y 1908 sólo en cuatro ocasiones superan la media del período 1951-1980, lo que dificultaría la recuperación del volumen de hielo.

4.2.4. Características climáticas del período 1901/1914-20

Durante este episodio el glaciar de la Maladeta continúa su proceso de degradación, si bien más moderado que en el período anterior, en unas décadas en las que, frente a la segunda mitad del XIX, las temperaturas anuales y de verano quedan en general en valores inferiores al de referencia, con diferencias medias respecto de ese umbral en el

conjunto del periodo de 0,2°C y 0,1°C respectivamente. Salvo en el tránsito secular, en el que la media anual supera en 0,4°C la de referencia en el intervalo 1899-1905, no se detectan en este período episodios cálidos significativos y sí uno de carácter frío en el intervalo 1906-1913, con un descenso medio de las temperaturas de verano de 0,45°C y de 0,28°C las anuales. No obstante, se trata de una fase con precipitaciones escasas, con un descenso medio del 20% de la precipitación de invierno y del 9,4% de las anuales en el intervalo 1898-1908 y del 22,4% y 6,6% en el 1914-1920 que, como en el episodio anterior, y a pesar de las temperaturas frescas, dificultaría la recuperación del glaciar.

4.2.5. Características climáticas del período 1914-20/1934-35

La temperatura media anual y las medias de verano registran, a lo largo de este episodio de estabilización de la masa glaciar, valores que no se alejan demasiado de la media de referencia, sin detectarse, salvo en el tramo final del período ahora analizado, anomalías frías destacables. Es entonces cuando se percibe cierto descenso de las temperaturas, en concreto en el intervalo 1929-1932, en el que la media de verano es 0,4°C inferior a la de referencia y 0,21°C la anual. Las precipitaciones también se sitúan en torno a la media de referencia, aunque ligeramente por debajo la mayoría de los años. No aparecen, sin embargo, períodos secos significativos.

4.2.6. Características climáticas del período 1934-35/1957

A lo largo de estas dos décadas, el glaciar exhibe unas tasas anuales de retroceso moderadas, aunque mayores que en el 1901/1914-20. Se trata de un período de características climáticas más complejas que los anteriores, en el que desde el punto de vista térmico destaca el episodio cálido de la segunda mitad de la década de los años cuarenta, el intervalo 1945-1950, en el que las temperaturas de verano superan en 0,25°C la media de referencia y la temperatura media anual en 0,4°C, y la crisis posterior de las medias estivales, que caen 0,7°C entre 1951 y 1957. Por el contrario las precipitaciones de esa segunda mitad de la década de los cuarenta son escasas, con un descenso medio de la

precipitación invernal del 10% y del 8% la anual, recuperándose notablemente los registros en la década de los cincuenta.

4.2.7. Características climáticas del período 1958/1981

En este período, en el que el cuerpo glaciar muestra una marcada estabilización, la evolución del clima es de nuevo compleja, con un importante contraste entre la década de los sesenta y la de los setenta. La primera es especialmente cálida y seca, con una temperatura media de verano entre 1961 y 1971 0,6°C por encima del umbral de referencia y 0,43°C la anual, y con precipitaciones de invierno y anuales entre un 12% y un 15% por debajo de los totales medios del período de referencia. En la de los setenta sin embargo, la situación es distinta, más en concreto en la segunda mitad de la década, con unas temperaturas medias de verano y anuales 0,5° y 0,6°C por debajo de la media de referencia respectivamente entre 1975 y 1979 y precipitaciones de invierno en ese mismo intervalo que superan en un 13% la media del 1951-1980. Una fase pues de estabilización del cuerpo de hielo que, desde el punto de vista climático, ofrece sin embargo dos momentos con características termopluviométricas bien distintas, uno especialmente favorable a la deglaciación en los sesenta y otro más favorable para la conservación de la masa glaciar en la segunda mitad de los setenta.

4.2.8. Características climáticas del período 1981/1990

La década de los años ochenta del siglo XX presenta tasas anuales de pérdida de superficie que, como ya se ha señalado, son similares a las que mostró el glaciar de la Madaleta en el comienzo del proceso de deglaciación posterior a la pulsación final de la PEH, en la segunda mitad del siglo XIX. Coinciden estos años con una fase de temperaturas elevadas, en especial en verano, superándose la media estival del período de referencia en 1,35°C entre 1980 y 1990, y en 0,15°C la anual. Situación por tanto térmicamente desfavorable para el mantenimiento del balance de masa que coincide, además, con el episodio seco más importante del período reconstruido aquí analizado, con una precipitación de invierno inferior a la media de referencia en algo más de un 50% y la anual en un 29%.

4.2.9. Características climáticas del período 1991/1999

Condiciones termopluviométricas similares a la década de los ochenta ofrece este episodio de deglaciación también acelerada del glaciar de la Maladeta. Se trata de un período para el que ya no disponemos de información dendroclimática (las reconstrucciones finalizan en el año 1992) aunque sí de datos instrumentales, mostrando las series regionales obtenidas para el ámbito de la zona de estudio temperaturas estivales y anuales elevadas, aunque algo menos marcadas que en la década anterior, y precipitaciones que, salvo en el trienio 1994-1996, son también escasas. Tomando en consideración las dos décadas, estamos ante uno de los períodos más cálidos y seguramente el más seco en las dos centurias analizadas, coincidiendo con la deglaciación acelerada que ha conducido a la fragmentación del glaciar de la Maladeta en sus dos cuerpos actuales.

5. Conclusiones

De los datos expuestos hasta aquí, cabría resaltar algunas cuestiones:

- 1) En primer lugar, constatar que el evidente proceso de deglaciación que afecta a los glaciares pirenaicos desde el último máximo de la PEH hasta la actualidad, queda perfectamente ejemplificado en el glaciar de la Maladeta. Únicamente en algunos breves tramos de los últimos 180 años, se han producido situaciones de estabilización en el proceso mencionado. De las 152,3 ha de superficie en 1820-30, el glaciar ha pasado a contar con apenas 54,5 ha en 1997-99 (la suma de la extensión de los actuales glaciares Occidental y Oriental de la Maladeta), el 35,7% de la inicial. Estos valores de retroceso están en consonancia con los ofrecidos por Chueca y Julián (2002) para los principales macizos pirenaicos hoy en día glaciados, que muestran porcentajes actuales de extensión respecto al máximo inicial de la PEH muy similares: del 32,0% en la totalidad del macizo de la Maladeta-Aneto, del 39,2% en el de Posets, del 24,9% en el de Taillón-Monte Perdido y del 33,6% en el de Infiernos-Punta Zarra.

- 2) Es clara también la repercusión que tienen las dos variables climáticas examinadas en las pautas de dinamismo glaciar. Las modificaciones por encima o debajo de los valores de referencia, tanto de los valores térmicos anuales y de verano, como de las precipitaciones anuales y de invierno, tienen su reflejo en las fases de retroceso o estabilización detectadas. Particularmente evidentes son las relaciones clima-dinámica glaciar en los episodios de pérdida acelerada de extensión 1857/1901 y 1981/1990, o en los de estabilización 1820-30/1857 y 1958/1981.
- 3) Otro hecho a resaltar es el de la rápida respuesta exhibida por el glaciar de la Maladeta, fundamentalmente en términos de pérdida de extensión superficial, ante los cambios detectados en los factores climático-ambientales analizados. La inercia que exhiben cuerpos glaciares de mayores dimensiones ante modificaciones climáticas prácticamente queda obviada en el caso de glaciares de tamaño muy reducido como el aquí estudiado. Este hecho debe resaltarse, pues convierte a los pequeños restos glaciares pirenaicos en indicadores *proxy* fiables, evidentes y prácticamente inmediatos, del proceso de cambio climático detectado en la actualidad a escala global.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de los proyectos H-9007 (*Estudio de la dinámica de los glaciares del Pirineo aragonés*), financiado por el Gobierno de Aragón; UZ2002-HUM-01 (*Estudio de la dinámica glaciar en el Pirineo español en el contexto del cambio climático: correlación con reconstrucciones dendroclimáticas termo-pluviométricas*), financiado por la Universidad de Zaragoza; ECLIPSE (*Environnement et climat du passé: histoire et évolution*), financiado por el CNRS; y CLI96-1862 (*Precipitaciones y temperaturas de la mitad septentrional española a partir del siglo XVII. Reconstrucciones dendroclimáticas*), financiado por la CICYT. Los autores agradecen igualmente las interesantes sugerencias efectuadas por los evaluadores del trabajo, Dres. J.L. Peña y J. Bordonau.

Referencias bibliográficas

- Chueca, J. & Julián, A. (1996). Datación de depósitos morrénicos de la Pequeña Edad del Hielo: macizo de la Maladeta. En: *Dinámica y Evolución de Medios Cuaternarios* (A. Pérez Alberti, P. Martini, W. Chesworth & A. Martínez Cortizas, eds.). Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, 171-182.
- Chueca, J. & Julián, A. (2002). *Los glaciares pirenaicos aragoneses: estudio de su evolución desde el final de la Pequeña Edad del Hielo hasta la actualidad a través de documentación fotográfica*. Diputación de Huesca, Huesca, 323 pp.
- Chueca, J., Peña, J.L., Julián, A. & Blanchard, E. (2000). Dinámica de los glaciares del Pirineo aragonés: resultados de la campaña glaciológica del año 1998. *Boletín Glaciológico Aragonés*, 1, 13-41.
- Chueca, J., Julián, A., Saz, M.A., Creus, J., López Moreno, I. & Lapeña, A. (2001). Estudio de la evolución del glaciar de Coronas (macizo de la Maladeta; Pirineo central español) desde el final de la Pequeña Edad del Hielo hasta la actualidad, y de su relación con el clima. *Boletín Glaciológico Aragonés*, 2, 81-115.
- Cook, E.R. & Kairiukstis, L.A. (eds) (1990). *Methods of dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers, London, 394 pp.
- Copons, R. & Bordonau, J. (1994). La Pequeña Edad del Hielo en el Macizo de la Maladeta (Alta cuenca del Ésera, Pirineos centrales). En: *El glaciario surpirenaico: nuevas aportaciones* (C. Martí Bono & J.M. García Ruiz, eds.). Geoforma Ediciones, Logroño, 111-124.
- Copons, R. & Bordonau, J. (1997). El registro glaciar correspondiente a la Pequeña Edad del Hielo en la Península Ibérica. En: *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación* (J.J. Ibáñez, B.L. Valero & C. Machado, eds.). Geoforma Ediciones, Logroño, 295-310.
- Creus, J. (1991). Tendencia secular de la temperatura de mayo en el Pirineo oriental. *Notes de Geografía Física*, 20-21, 41-49.
- Escudier, J. (1972). *L'Aneto i els seus homes*. Montblanc-CEC, Barcelona, 233 pp.
- Fernández, A. & Manrique, E. (1997). *Nueva metodología para la reconstrucción dendroclimática y aplicaciones más importantes*. INIA, Madrid, 127 pp.
- Fritts, H. (1990). Modelling tree-ring and environmental relationships for dendrochronological analysis. En: *Forest growth process modeling of responses to environmental stress* (C. Dixon, ed.). Timers Press, Oregon, 360-382.
- Fritts, H. (1991). *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. University of Arizona Press, 420 pp.
- Guiot, J. (1990). Methods of calibration. En: *Methods of dendrochronology* (E.R. Cook & L.A. Kairiukstis, eds.). Kluwer Academic Publishers, Londres, 165-172.
- Joanne, A. (1862). *Itinéraire général de la France. Les Pyrénées*. Hachette, Paris, 767 pp.
- Julián, A. & Chueca, J. (1998). Le Petit Âge Glaciaire dans les Pyrénées Centrales Méridionales: estimation des paléotempératures à partir d'inférences géomorphologiques. *Sud-Ouest European*, 3, 79-88.
- Julián, A., Chueca, J., Peña, J.L., López Moreno, I. & Lapeña, A. (2001). Dinámica de los glaciares del Pirineo aragonés: resultados de la campaña glaciológica del año 1999. *Boletín Glaciológico Aragonés*, 2, 13-36.
- Lampre, F. (1994). La línea de equilibrio glaciar y los suelos helados en el macizo de la Maladeta (Pirineo aragonés): evolución desde la Pequeña Edad del Hielo y situación actual. En: *El glaciario surpirenaico: nuevas aportaciones* (C. Martí Bono & J.M. García Ruiz, eds.). Geoforma Ediciones, Logroño, 125-142.
- Lampre, F. (1996). Evolución glaciar de Ballibierna (Macizo de la Maladeta, Pirineo Aragonés). En: *Dinámica y Evolución de Medios Cuaternarios* (A. Pérez Alberti, P. Martini, W. Chesworth & A. Martínez Cortizas, eds.). Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, 143-155.
- Martínez, R. & García, F. (1994). Trabajos de glaciología en el glaciar de la Maladeta. Campaña 1991-92. En: *La nieve en las cordilleras españolas* (MOPTMA, ed.). MOPTMA, Madrid, 209-236.
- Martínez, R., García, F., Macheret, Y., Navarro, J. & Bisbal, L. (1997). El sustrato subglaciar y la estructura interna de los glaciares del Aneto y la Maladeta cartografiados por geo-radar de ultra-alta frecuencia (UHF). En: *La nieve en las cordilleras españolas* (Ministerio de Medio Ambiente, ed.). Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 227-249.
- Martínez de Pisón, E. & Arenillas, M. (1988). Los glaciares actuales del Pirineo español. En: *La nieve en el Pirineo español* (MOPU, ed.). MOPU, Madrid, 29-98.
- Packe, C. (1867). *A guide to Pyrenees*. Longmans Green and Co., London, 301 pp.
- Parrot, F. (1823). *Reise in den Pyrenäen*. G. Reiner, Berlin, 145 pp.
- Saz, M.A. (2002). *Análisis de la evolución del clima en la mitad septentrional de España desde el siglo XV a partir de series dendroclimáticas*. Tesis Doctoral (inédita), Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, 1052 pp.
- Saz, M.A. & Creus J. (2001). El clima del Pirineo centro-oriental desde el siglo XV: estudio dendroclimático del observatorio de Capdella. *Boletín Glaciológico Aragonés*, 2, 37-79.
- Schrader, F. (1936). Sur l'étendue des glaciers des Pyrénées. *Annuaire du Club Alpin Français*, 1894. Reeditado en Schrader, F. (1936). *Pyrénées (II. Science et Art)*. Privat-Didier Éditeurs, Toulouse-Paris, 201-221.

Recibido 1 de febrero de 2003.

Aceptado 11 julio de 2003.