

LOS CIRCOS GLACIARES EN LOS ALTOS VALLES DEL ARAGÓN Y DEL GÁLLEGO (PIRINEO CENTRAL ESPAÑOL). ANÁLISIS MORFOMÉTRICO Y VARIACIONES ESPACIALES

J. M. GARCÍA RUIZ⁽¹⁾, A. GÓMEZ VILLAR⁽²⁾, L. ORTIGOSA⁽³⁾ & C. MARTÍ BONO⁽¹⁾

(1) Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de Aula Dei, Apartado 202, 50080-Zaragoza.

(2) Departamento de Geografía, Campus de Vegazana, Universidad de León, 24071-León.

(3) Area de Geografía Física, Dpto. de Ciencias Humanas y Sociales, Universidad de La Rioja, 26004-Logroño.

Resumen. En los altos valles del Aragón y del Gállego, Pirineo español, se han identificado 206 circos glaciares con el fin de estudiar los factores geoambientales que explican su distribución (altitud, exposición, litología) y diversas características morfométricas (superficie, anchura, longitud, relaciones longitud/anchura, etc.). La aplicación de diversos análisis estadísticos (bivariados y multivariados) confirma que una parte de la variabilidad morfométrica de los circos glaciares se justifica por los factores geoambientales estudiados, pero su influencia es relativamente limitada. La altitud se ha mostrado como el factor de mayor importancia, al influir positivamente tanto en la longitud como en el grado de sobreexcavación. El papel de la litología es menos evidente debido a sus interacciones con la altitud.

Palabras clave: Morfometría de circos, Distribución de circos, clasificación de circos, Pirineos.

Abstract. 206 glacial cirques have been identified in the high valleys of the Aragon and Gallego rivers, Central Spanish Pyrenees, in order to study the environmental factors explaining their spatial distribution (altitude, aspect, lithology) and several morphometric features (area, width, length, L/W relations, etc.). The use of bivariable and multivariable statistical analyses confirms that a part of the morphometric variability of the glacial cirques is explained by the environmental factors studied, but their influence is relatively limited. Altitude behaves as the most important factor, affecting both the length and the degree of overdeepening of the cirques. The role of the lithology is less obvious because of its interactions with the altitude.

Key-words: Cirque morphometry, Cirque distribution, Cirque classification, Pyrenees.

1. Introducción

La ya extensa bibliografía dedicada al estudio del glaciario pirenaico (ver Martínez de Pisón & Antón Burgos, 1981; García Ruiz & Martí Bono, 1994; Chueca *et al.*, 1998) se ha centrado fundamentalmente en la localización y cronología de los depósitos glaciares y glaciolacustres. Tales depósitos se han utilizado como argumento para determinar la extensión máxima alcanzada por los glaciares de valle pirenaicos y las sucesivas etapas de avance, estacionamiento y retroceso de los mismos. Sin embargo, existen muy pocas referencias a las formas glaciares, que se resuelven con una rápida descripción que confirma la importancia de la erosión glacial cuaternaria o sirve de argumento para respaldar los límites que alcanzó lateral o frontalmente el hielo. Las descripciones de circos y artesas elaboradas por Martínez de Pisón (1989) en el valle del Ésera y por Martínez de Pisón (1996) y Serrano (1998) en el valle del Gállego constituyen a este respecto una notable excepción.

Los estudios sobre morfometría de circos han sido relativamente frecuentes en otras cordilleras del mundo. Así, Embleton & Hamann (1988) compararon la forma de los circos en los Alpes austriacos y los Highlands escoceses; Aniya & Welch (1981) realizaron un análisis morfométrico de circos antárticos; Trenhaile (1976) analizó la morfometría de los circos de las Montañas Rocosas de Canadá; Unwin (1973) se centró en la orientación y distribución de circos y neveros en Gales; Vilborg (1984) analizó la forma de los circos en Suecia central; Rudberg (1984) y Rapp (1984) estudiaron los circos y nichos de nivación a altitudes bajas en el centro y en el sur de Suecia respectivamente; y Evans & Cox (1995) han estudiado la forma de los circos glaciares en el Lake District, Inglaterra. A una escala mundial, Evans (1977) ha abordado la distribución de los circos según la orientación. Recientemente, Alonso (1994) ha relacionado diversas características morfométricas de los circos glaciares con la litología, la orientación y la disposición de los estratos en la Cordillera Cantábrica.

La observación —aunque sólo sea en la cartografía geomorfológica disponible— de los circos glaciares del Pirineo Central permite deducir una gran variedad de formas y tamaños. Esta variedad se halla relacionada con una serie de factores topográficos y estructurales que han favorecido en mayor o menor medida la erosión glacial. El objetivo de este trabajo es analizar algunos rasgos de la distribución espacial y diversidad morfométrica de los circos glaciares, realizar una clasificación de los mismos y jerarquizar los factores que explican sus más destacados parámetros morfológicos.

2. El área de estudio

El área de estudio coincide con lo que se conoce como Alto Aragón Occidental (Figura 1), incluyendo la cuenca alta del río Aragón (valles de los ríos Veral, Aragón Subordán, Osia, Estarrún y Aragón) y el Alto Gállego (con sus afluentes Aurín y Caldarés). Todos los valles se dirigen de norte a sur, cortando la estructura geológica de los Pirineos, que se organiza en bandas paralelas de oeste a este (Figura 2). La parte más septentrional corresponde al Pirineo Axial, con predominio de pizarras y esquistos devónicos, calizas devónicas y carboníferas y arcillas y areniscas pérmicas, con pequeñas intrusiones volcánicas (Anayet y Campo de Troya en el valle del Gállego) y los batolitos graníticos de Panticosa y Balaitus. La diversidad litológica y la complejidad estructural explican los fuertes contrastes de relieve, dominado por suaves pendientes en las áreas pizarrosas y por abruptos escarpes en los afloramientos calizos. Las mayores altitudes de este sector se alcanzan en los batolitos graníticos o en su aureola metamórfica (Pico del Infierno, 3072 m; Balaitus, 3151 m).

Al sur se desarrolla la estrecha banda conocida como Sierras Interiores, formando una estructura compleja con mantos cabalgantes superpuestos y vergentes hacia el sur, donde predominan calizas y areniscas del Cretácico y Eoceno. El relieve es muy escarpado y progresivamente más elevado, en promedio, hacia el este (Peña Forca, 2391 m; Bisaurín, 2670 m; Collarada, 2883 m; Telera, 2762 m).

Más al sur, el sector del flysch eoceno está intensamente plegado, si bien la homogeneidad litológica da lugar a un relieve más uniforme, con divisorias suaves que raras veces superan los 2000 m.

Durante el Pleistoceno los glaciares principales (Aragón Subordán, Aragón y Gállego) se originaban en la zona Axial, mientras que los secundarios (Veral, Osia, Estarrún, Aurín y otros de menor envergadura)

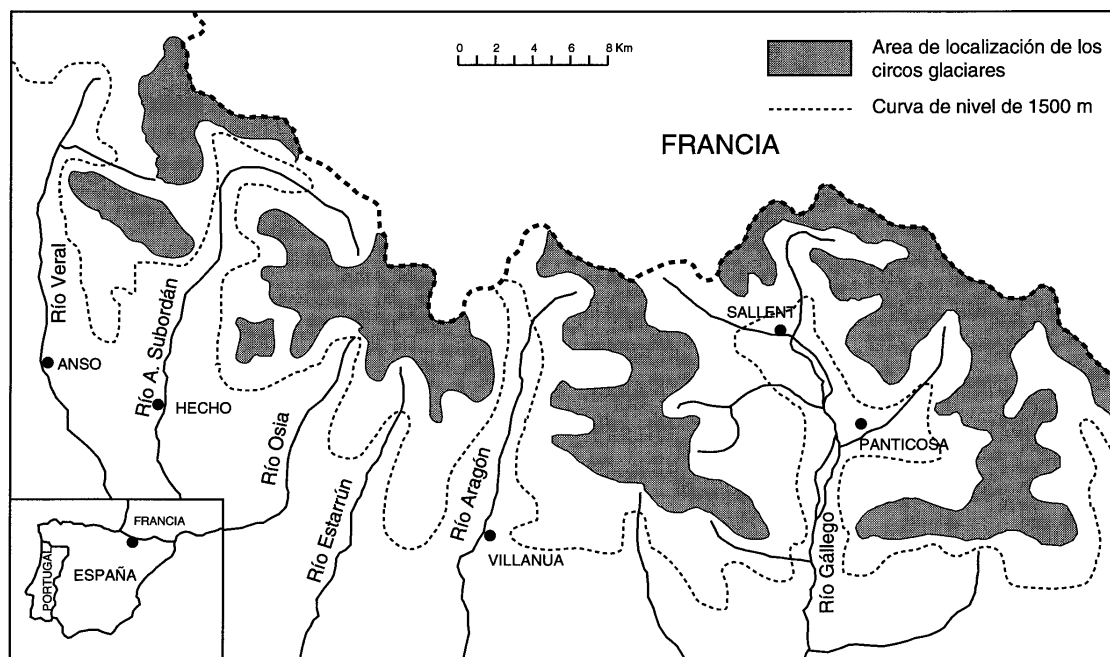


Figura 1. El área de estudio. Las zonas sombreadas corresponden a los sectores donde se localizan los circos glaciares.
The study area. Dark areas correspond to the sectors where glacial cirques locate.

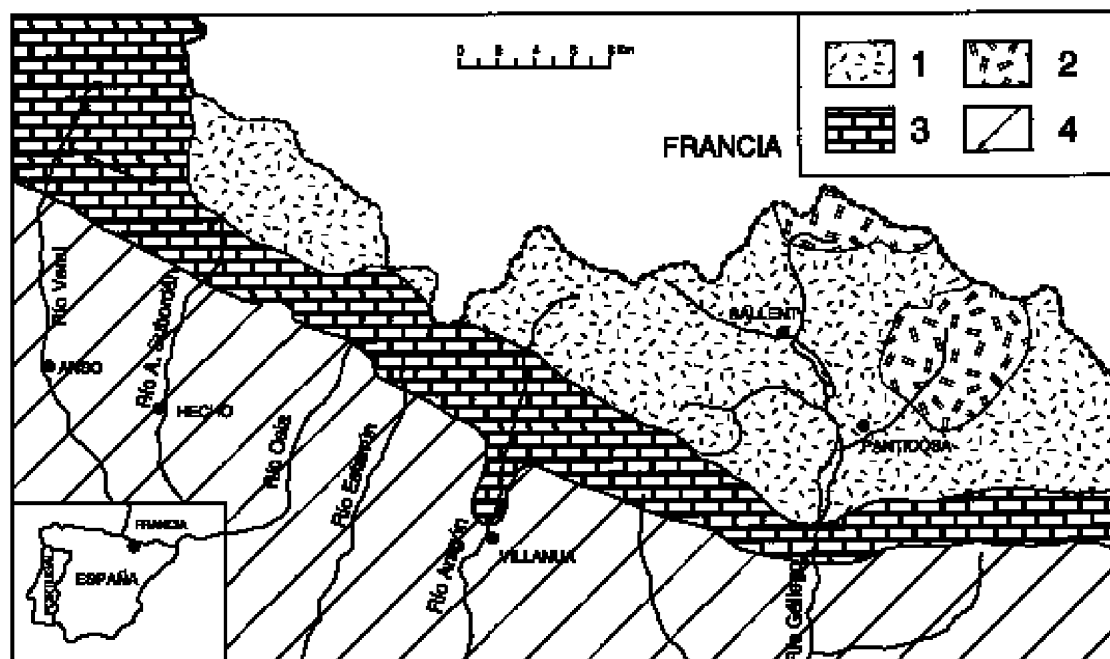


Figura 2. Esquema estructural simplificado del Alto Aragón Occidental (altos valles de los ríos Aragón y Gállego). 1. Pirineo paleozoico o axial. 2. Macizos graníticos. 3. Sierras Interiores (Cretácico y Eoceno). 4. Sector del flysch (Eoceno).
Structural, simplified framework of the Western High Aragon (upper valleys of the Aragón and Gállego rivers). 1. Axial, paleozoic Pyrenees. 2. Granitic massifs. 3. Inner Sierras (Cretaceous and Eocene). 4. Flysch sector, Eocene.

partían de las Sierras Interiores. Todos ellos alcanzaban el sector de flysch, donde finalizaban en amplias cubetas terminales (Barrère, 1966 y 1971; Penck, 1883; Panzer, 1948; Martí Bono, 1996; García Ruiz & Martí Bono, 1994; Serrano & Martínez de Pisón, 1994; Chueca *et al.*, 1998; Serrano, 1998).

3. Métodos

Como base para la elaboración del mapa de riesgos geomorfológicos del Alto Aragón Occidental se había ya realizado la cartografía geomorfológica de las hojas del M.T.N. correspondientes a Zuriza (n° 118), Ansó (n° 144), Sallent (n° 145), Jaca (n° 176) y Sabiñánigo (n° 177) (García Ruiz *et al.*, 1994), a escala 1: 50.000. En esta cartografía se identificaron 206 circos glaciares, que responden a las características básicas apuntadas por diferentes autores: áreas relativamente deprimidas, rodeadas de fuertes pendientes, de forma arqueada en plano, con una pendiente suave en el fondo (Trenahile, 1975); corresponden a las áreas de alimentación de los glaciares, en las que un excedente de acumulación de nieve ha favorecido (o favorece) la existencia de un glaciar de circo y ha contribuido al desarrollo de un glaciar de valle (Evans & Cox, 1995).

En los 206 circos identificados se procedió a medir los siguientes parámetros:

- **Altitud máxima:** Corresponde a la altitud máxima de la divisoria situada inmediatamente por encima del circo. Se ha tomado esta medida por considerar que es un buen indicador de la capacidad de innivación y de acumulación de hielo.
- **Altitud mínima:** Medida en la parte terminal del circo, coincidiendo muchas veces con una tendencia al estrechamiento entre las paredes o con un umbral glaciar.
- **Longitud (L):** la distancia existente entre la pared de fondo del circo y el punto en que se ha medido la altitud mínima, siguiendo la línea de máxima pendiente o, lo que suele ser lo mismo en este caso, siguiendo el vector de la exposición dominante.
- **Anchura (A):** La distancia máxima entre las paredes, tomada siguiendo la línea transversal a la máxima pendiente del circo.
- **Exposición:** Se han distinguido ocho categorías (norte, nordeste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste).
- **Litología:** Se han diferenciado siete categorías: 1) Calizas; 2) Flysch; 3) Permotriás (areniscas, arcillas y conglomerados); 4) Pizarras; 5) Areniscas; 6) Granito; 7) Cuarzitas/pizarras, a partir del mapa litológico simplificado de Soler & Puigdefábregas (1972).

Además de las anteriores variables básicas, se ha ampliado la información con las variables derivadas de los índices morfométricos:

- La diferencia o desnivel entre altitud máxima y mínima de cada circo (H) medida en metros (Aniya & Welch, 1981).
- La relación existente entre la longitud y la anchura de cada circo (índice L/A), que es un buen indicador de la forma en plano de los circos.
- La relación entre la longitud y el desnivel del circo (L/H). Expresa el grado de sobreexcavación experimentado por el circo glaciar.
- La superficie (en ha) ocupada por cada circo. Se obtiene de la longitud y la anchura, siguiendo una fórmula de compromiso que minimiza los errores de cálculo ($\text{Superficie} = L \times A \times 0.75$).

Esta información ha sido codificada y organizada en una base de datos apropiada para el tratamiento estadístico (SPSS v. 7), a partir del cual se realizaron los análisis y gráficos descriptivos básicos (tablas, histogramas de frecuencias), así como los restantes procedimientos bivariantes de contraste (anovas) y asociación (tablas de contingencia, correlaciones y regresiones). Se ha puesto especial énfasis en la aplicación de procedimientos multivariantes para detectar las pautas de distribución y diversidad morfométrica de los circos glaciares: Análisis de Conglomerados y Análisis Discriminante. Los Análisis de Conglomerados (cluster) se han empleado para obtener un número limitado de grupos de circos (minimización de las tendencias euclídeas y selección manual a partir del dendrograma), considerando exclusivamente las variables morfométricas. El Análisis Discriminante ha aportado sobre todo explicaciones cuantitativas a la diferenciación de los tipos de circos (grupos del cluster) en relación con las variables geoambientales.

4. Resultados

4.1 La distribución de los circos glaciares

La Figura 3 ilustra sobre la distribución de los circos glaciares en función de la altitud, la exposición y la litología. Así, la altitud máxima, que se refiere a la altitud de la divisoria situada inmediatamente por encima de cada circo, muestra una marcada concentración en torno a 2500-2700 m. Por debajo de 2100 m la presencia de circos es muy baja, pudiendo establecerse en torno a 2000 m el umbral mínimo para favorecer la génesis de circos glaciares durante las fases frías del Pleistoceno.

La altitud mínima —es decir, la relacionada con el borde frontal de los circos— oscila entre 1680 y 2800 m, alcanzando la máxima frecuencia entre 2000 y 2200 m. Conviene recordar que el fondo de los circos situados a menor altitud puede considerarse como una verdadera línea de nieves permanentes, que marca la diferencia entre las áreas con balance positivo de acumulación de nieve y las áreas en que la ablación es superior a la acumulación. Esta línea de nieve se situaría entre 1700 y 1800 m en el área de estudio durante el máximo glaciar.

Por exposiciones, hay dos clases que predominan sobre las demás, la norte (22%) y, en menor medida, la sur (16%). El resto de las clases quedan equiparadas en torno a un 10% de presencia. Esta distribución sugiere que, en el área de estudio, los circos glaciares han podido formarse en cualquier exposición, incluso en las consideradas como teóricamente más desfavorables (W, SW y S). La presencia relativamente mayor de circos en exposiciones norte y sur se debe a la disposición de la estructura pirenaica, formando frecuentes alineaciones en sentido oeste-este, en especial las Sierras Interiores y la divisoria principal entre la vertiente mediterránea y la atlántica.

Por último, por litologías sobresalen las calizas, en las que se asienta más del 50% de los circos, seguidas por las pizarras (en torno al 15%) y las cuarcitas/pizarras (en torno al 12%). Los circos en rocas metamórficas y permotriásicas y en granitos apenas tienen representación en el conjunto del Alto Aragón Occidental, lo que no significa en principio nada especial. En realidad estas cifras están muy relacionadas con la importancia relativa de cada litología por encima de un determinado umbral altitudinal. En el área de estudio las mayores altitudes se asocian a determinadas litologías (granitos, especialmente), dando lugar a un elevado «efecto de autocorrelación espacial».

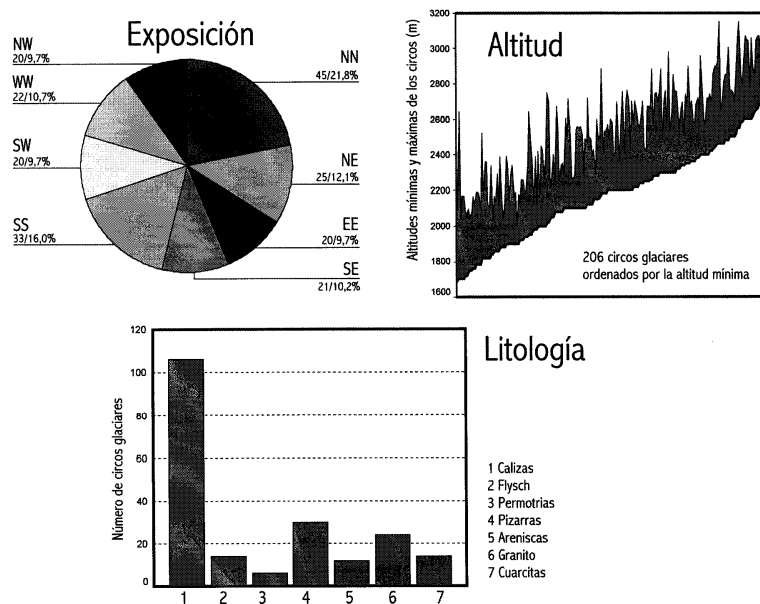


Figura 3. Distribución de los circos glaciares en función de la altitud, la exposición y la litología.
Distribution of glacial cirques according to altitude, aspect and lithology.

4.2 *Caracterización morfométrica de los circos glaciares. Tipos de circos*

Los circos presentan una gran variabilidad morfométrica (Tabla 1). La anchura muestra una marcada agrupación entre 100 y 1000 m (182 circos en total), con un valor medio de 691 m. La longitud presenta también una gran concentración en las clases menores, especialmente entre 100 y 500 m, con una media de 519 m. Esto permite deducir que se trata de circos de dimensiones moderadas, con una superficie media de 33 ha, similar a la estimada por Ortigosa (1986) en Sierra Cebollera (34 ha), en el Sistema Ibérico, y a la reseñada por otros autores en montañas europeas afectadas por una actividad glacial más intensa (ver Bennett, 1990, y Evans & Cox, 1995).

Dado que el índice longitud/anchura es de 0.79, en planta los circos estudiados son más anchos que largos (Serrano, 1998), como sucede en otras cadenas montañosas del mundo (Evans & Cox, 1995; Bennett, 1990). Como la relación entre la longitud y el desnivel de los circos (L/H) es de 1.48, se deduce que son relativamente profundos, como resultado de un proceso activo de sobreexcavación, superior al estimado en la Sierra Cebollera (Ortigosa, 1986), aunque quedan muy por debajo de los valores estimados por Aniya & Welch (1981) en la Antártida y por Manley (1959) en el noroeste de Inglaterra.

Con la información morfométrica se ha realizado un análisis multivariable clasificatorio (análisis de conglomerados, con perspectiva del dendrograma de distancias) y se han seleccionado 4 tipos de circos, que representan el 92.4% (194) de la totalidad de los circos. Los 12 circos restantes, del total de 206, han quedado excluidos de la clasificación por su morfología especial (circos de formas irregulares). Los 4 tipos identificados son los siguientes (Tabla 2):

- i) Circos muy anchos y profundos, de dimensiones variables, con una relación longitud/anchura de 0.4. En total son 21 circos, con una superficie media de 46 ha.
- ii) Circos alargados y estrechos, de pendiente suave, sin auténtica sobreexcavación. Este grupo incluye 17 circos, con una superficie media de 26 ha. La relación longitud/anchura es de 1.48.
- iii) Circos de planta cuasicircular y profundos. Agrupa a un total de 122 circos, por lo que podríamos considerarlo como el modelo típico de circo en el área de estudio. La superficie media es de 21 ha y la relación longitud/anchura es de 0.76.
- iv) Circos de planta cuasicircular, pero de pendiente suave, sin sobreexcavación. Este grupo incluye un total de 34 circos, con una superficie media de 50 ha. La relación longitud/anchura es de 0.9.

Tabla 1. Rasgos morfométricos de los circos glaciares en el área de estudio.
Morphometric features of glacial cirques in the study area.

	<i>Media</i>	<i>Valor máximo</i>	<i>Valor mínimo</i>	<i>Desviación típica</i>
Superficie (ha)	33	314	3	39
A: Anchura (m)	691	2700	200	395
L: Longitud (m)	519	1600	100	284
H: Desnivel (m)	364	943	100	138
L/A	0.79	2.00	0.25	0.31
L/H	1.48	3.98	0.39	0.69

Tabla 2. Caracterización media de los distintos tipos de circos.
Mean characterization of the different patterns of glacial cirques.

	<i>Casos</i>	<i>Superficie(ha)</i>	<i>L/A</i>	<i>L/H</i>
Tipo 1	21	46	0.40	1.09
Tipo 2	17	26	1.46	1.47
Tipo 3	122	21	0.76	1.17
Tipo 4	34	50	0.90	2.52
Todos	194	33	0.79	1.49

4.3 Factores en la morfometría de los circos glaciares.

Los circos glaciares están presentes en una gran variedad de situaciones topográficas a condición de que la divisoria que domina el circo se sitúe al menos a 2000 m s.n.m. Igualmente existe una gran diversidad de formas y tamaños. Para explicar esta diversidad debemos considerar que la altitud, la exposición y la litología son factores condicionantes en la forma y tamaño de los circos, es decir, desde una perspectiva analítica actúan como variables independientes, mientras que los rasgos morfométricos se consideran respuestas o variables dependientes. Los análisis de correlaciones (r de Pearson) muestran unas asociaciones poco significativas en general, cuando no redundantes (Tabla 3). Así, la correlación lineal entre altitud máxima y superficie de los circos es de $r=0.239$, lo que significa que la altitud como único factor sólo explica el 5.7% (coeficiente de determinación) de la dimensión de los circos glaciares. Algunas correlaciones son elevadas, pero contribuyen poco a explicar los rasgos morfométricos de los circos, como es el caso de la asociación lineal entre la anchura y la longitud ($r=0.678$).

Los Análisis de Varianza (anovas) efectuados muestran en la práctica escasas asociaciones entre los factores ambientales y la morfología glacial, si bien en algunos casos ofrecen una significación elevada (>90 % de confianza). Las tablas 4, 5 y 6 incluyen los resultados sintéticos de los Análisis de Varianza ensayados con las distintas variables morfométricas (factores) en función de las categorías (grupos) de la altitud, la exposición y la litología.

La Tabla 4 muestra que la altitud ejerce una influencia positiva sobre la longitud de los circos, de manera que estos últimos tienden a ser más largos cuanto mayor es la altitud de la divisoria dominante. De hecho, la longitud aumenta claramente a medida que lo hace la altitud, mientras que la anchura apenas se

Tabla 3. Matriz de correlaciones entre los indicadores morfométricos y altitudinales.
Correlation matrix between morphometric and altitudinal indicators

	ALTMAX	ALTMIN	ANCHURA	LONGITUD	ALTURA	L/A	L/H	SUPERF
ALTMAX	—	.876(**)	.148(*)	.363(**)	.397(**)	.346(**)	.062	.239(**)
ALTMIN	.876(**)	—	-.133	.112	-.095	.338(**)	.188(**)	-.032
ANCHURA	.148(*)	-.133	—	.678(**)	.559(**)	-.270(**)	.299(**)	.901(**)
LONGITUD	.363(**)	.112	.678(**)	—	.537(**)	.422(**)	.649(**)	.846(**)
ALTURA	.397(**)	-.095	.559(**)	.537(**)	—	.071	-.229(**)	.554(**)
L/A	.346(**)	.338(**)	-.270(**)	.422(**)	.071	—	.395(**)	.017
L/H	.062	.188(**)	.299(**)	.649(**)	-.229(**)	.395(**)	—	.448(**)
SUPERF.	.239(**)	-.032	.901(**)	.846(**)	.554(**)	.017	.448(**)	—

** Significación estadística bilateral igual o superior al nivel 0.01

* Significación estadística bilateral igual o superior al nivel 0.05

Tabla 4. Valores medios y significaciones estadísticas (p) de los análisis de varianza de las variables morfométricas en función de categorías altitudinales

Mean values and statistical significances (p) of analyses of variance of morphometric variables according to altitudinal categories.

Grupo (m)	Número de circos	(1) Superficie (ha)	(2) Longitud (m)	(3) Anchura (m)	(4) L/A	(5) L/H	(6) Desnivel (m)
-2000	24	24	434	648	0.68	1.41	331
2000-2200	39	36	433	701	0.66	1.44	328
2200-2400	49	39	510	706	0.78	1.43	366
2400-2600	56	42	562	718	0.83	1.48	389
2600-2800	22	36	559	668	0.90	1.60	366
+2800	16	42	673	617	1.11	1.71	403
Total	206	37	519	691	0.80	1.49	364

(1) $p=0.777$

(2) $p=0.031$

(3) $p=0.939$

(4) $p=0.000$

(5) $p=0.703$

(6) $p=0.213$

halla relacionada con la altitud (Figura 4). De igual modo, la relación entre la longitud y la anchura (L/A) de los circos aumenta de forma muy clara hacia las áreas más elevadas: así, entre las clases altitudinales más bajas los circos son claramente más anchos que largos (L/A = 0.66-0.68), mientras que en cumbres más elevadas la anchura y la longitud tienden a equipararse o incluso a decantarse del lado de la longitud (L/A = 0.90-1.11). Es importante también tener en cuenta que los indicadores de sobreexcavación (índice L/H y diferencia entre altitud máxima y mínima de cada circo) también aumentan de manera notable en los circos localizados a mayor altitud, si bien la significación estadística es baja. Se señalan aquí porque apuntan en la misma dirección que la longitud y la relación longitud/anchura (L/A): A medida que se asciende en altitud la actividad glacial ha sido más duradera, al haberse prolongado la presencia y la acción erosiva del hielo hasta estadios muy tardíos. La consecuencia es un progresivo encajamiento del circo por sobreexcavación. En el caso de los circos situados a menor altitud, las formas pueden estar bien definidas, pero no se llega a una sobreexcavación tan acusada, dando lugar a circos en pared de formas laxas.

La influencia de la exposición (Tabla 5) se manifiesta en el hecho de que los circos con orientación oeste son los más extensos, mientras que los orientados al sur y al sureste son los de menores dimensiones. También los circos expuestos al oeste son los más largos, pero la interpretación de este resultado no es sencilla. De hecho, en algunos macizos montañosos españoles se ha considerado a las exposiciones oeste y noroeste como poco favorables a la acumulación glacial (García Ruiz, 1979; Ortigosa, 1986). Que debido

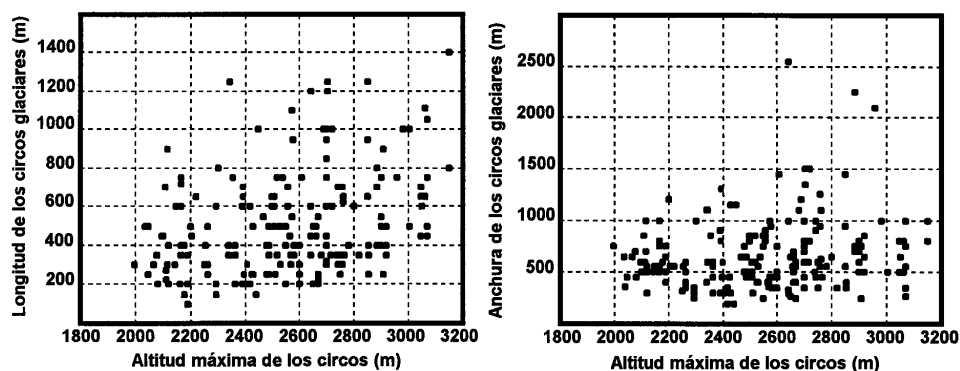


Figura 4. Relaciones entre la altitud del relieve dominante sobre los circos y su longitud y anchura.
Relations between altitude of the divides over glacial cirques and their length and width.

Tabla 5. Valores medios y significaciones estadísticas (p) de los análisis de varianza de las variables morfológicas en función de la exposición solar
Mean values and statistical significances (p) of analyses of variance of morphometric variables according to the aspect

Grupo	Número de circos (ha)	Variables morfológicas					
		(1) Superficie (m)	(2) Longitud (m)	(3) Anchura	(4) L/A	(5) L/H	(6) Desnivel (m)
N	45	35	497	753	0.76	1.32	404
NE	25	36	506	710	0.81	1.45	345
E	20	26	484	671	0.76	1.53	343
SE	21	23	483	569	0.87	1.41	364
S	33	25	460	620	0.75	1.37	353
SW	20	29	493	727	0.73	1.66	307
W	22	56	773	842	0.95	1.92	409
NW	20	29	499	588	0.83	1.48	340
Total	206	33	519	691	0.80	1.49	364

(1) p=0.094

(2) p=0.004

(3) p= 0.251

(4) p= 0.202

(5) p= 0.051

(6) p= 0.120

a ello sean amplios y de pendiente suave, es explicable, pero que además sean los más largos no parece estar justificado, excepto por razones estructurales.

De todas formas, es importante considerar que los circos orientados al oeste son los que se encuentran dominados por cumbres y divisorias más elevadas (2736 m de media), seguidos por los circos orientados al norte (2604 m) y noroeste (2554 m). Por el contrario, los circos orientados al este se localizan por término medio a menor altitud (2338 m), igual que los circos orientados al nordeste (2483 m). Esta distribución confirma las condiciones desfavorables de la exposición oeste, por lo que es difícil la presencia de circos glaciares a altitudes bajas en esa exposición. La situación contraria es la de los circos orientados al este y nordeste, con menor insolación y condiciones más favorables para la acumulación de nieve por efecto de los vientos dominantes del oeste y noroeste.

Es difícil, por último, desligar la influencia de la litología (Tabla 6) de la provocada por la altitud, pues en determinadas áreas del Pirineo existe una notable relación entre ambas variables. No obstante, parece claro que los circos localizados sobre granitos son, con diferencia, los más extensos (55 ha), como también son los más largos (791 m) y los que presentan índices L/A(1.01) y L/H (2.05) más elevados, siempre con resultados sensiblemente alejados del resto de las litologías. En el extremo opuesto se encuentran los circos del flysch, con dimensiones muy modestas (21 ha), muy cortos (389 m) y con una baja relación L/A (0.57). Las restantes litologías presentan valores intermedios.

Los circos en granito y en flysch responden a dos modelos opuestos sobre litologías de comportamiento bien contrastado. En el primer caso se localizan muchos de los ejemplos más acabados de circos de formas redondeadas, frecuentemente más largos que anchos, afectados por una sobreexcavación profunda que se explica por la eficacia con que ha actuado el hielo. De hecho, es en los granitos donde se localiza el mayor número de cubetas de sobreexcavación (García Ruiz, 1991), ocupadas por lagos o ibones, frecuentemente alineados siguiendo las fracturas que atraviesan los macizos graníticos (Barrère, 1952). Estas fracturas (especialmente en sentido oeste-este, pero también siguiendo una orientación norte-sur) son responsables además del alargamiento de los circos glaciares sobre granitos, al haber dirigido no sólo algunos rasgos básicos del relieve preglaciar sino también los procesos de erosión glaciar.

En el caso del flysch los circos son pequeños —en parte por la baja altitud a la que se localizan— cortos y bastante anchos, con pendiente suave y escasa sobreexcavación. Son circos de pared, en cierto modo parecidos al modelo dominante en la Sierra de la Demanda (García Ruiz, 1979).

Con el fin de homogeneizar la información para un Análisis Discriminante, todos los factores han sido convertidos en variables binarias (0-1), de manera que cada una de las clases de altitud, exposición y litología pasan a ser variables independientes, y los tipos de circos (4 clases) son variables dependientes. La Tabla 7 muestra las cualidades estadísticas de las 3 funciones discriminantes que explican la presencia de los distintos tipos de circos. En la Tabla 8 se incluyen los coeficientes estandarizados de cada una de las

Tabla 6. Valores medios y significaciones estadísticas (p) de los análisis de varianza de las variables morfométricas en función de las litologías

Mean values and statistical significances (p) of analyses of variance of morphometric variables according to lithologies

Grupo	Número de circos	(1) Superficie	(2) Longitud (m)	(3) Anchura (m)	(4) L/A	(5) L/H	(6) Max-Min (m)
Calizas	106	29	468	646	0.78	1.34	363
Flysch	14	21	389	682	0.57	1.38	294
Permotrías	6	47	558	628	0.72	1.32	426
Pizarras	30	31	548	692	0.84	1.70	341
Areniscas	12	28	475	754	0.73	1.28	385
Granito	24	55	791	776	1.01	2.05	407
Cuarc./pizar.	14	32	526	743	0.83	1.48	367
Total	206	33	519	691	0.80	1.49	364

(1) p=0.088

(4) p= 0.001

(2) p=0.000

(5) p= 0.000

(3) p= 0.570

(6) p= 0.220

Tabla 7. Resumen de las funciones canónicas discriminantes.
Summary of the canonic discriminant functions.

<i>Función</i>	<i>Autovalor</i>	<i>% de varianza</i>	<i>% acumulado</i>	<i>r canónica</i>
1	.195	46.1	46.1	.404
2	.140	33.2	79.4	.351
3	.087	20.6	100.0	.283

Tabla 8. Coeficientes estandarizados de las variables de orientación, altitud y litología en las funciones discriminantes
Standardized coefficients of the aspect, altitude and lithology variables in the discriminant functions

<i>Litología</i>	<i>Función</i>			<i>Orientación</i>	<i>Función</i>			<i>Altitud</i>	<i>Función</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Calizas	.716	-.157	.496	N	-.143	-.088	.004	2000-2200	-.330	.029	-.130
Flysch	.086	-.176	.062	NE	.016	-.185	-.166	2200-2400	.124	-.017	.129
Permotr.	.375	-.153	-.093	E	-.074	.297	.006	2400-2600	.314	-.180	.128
Pizarras	.597	.093	.197	SE	.304	-.123	.403	2600-2800	.228	.137	.255
Areniscas	.428	-.092	.199	S	.010	-.051	.226	> 2800	.700	.026	-.645
Granitos	.340	.362	.445	SW	-.312	.358	-.184				
				W	-.079	.618	.181				

condiciones geoambientales en las funciones discriminantes canónicas. La Función 2 es la que mejor discrimina los circos situados a elevada altitud, sobre granitos, frente a los circos localizados a altitudes bajas y litología flysch. Los resultados, en todo caso, indican solamente tendencias. La Tabla 9, con los centroides de los tipos de circos en las funciones discriminantes, es más explícita: La primera función indica que los tipos 1 y 4 de circos glaciares se distinguen especialmente del tipo 2; la segunda función distingue entre el tipo 1 y el 4; y la tercera función distingue el tipo 3 de los tipos 1 y 2. La elaboración de tablas cruzadas entre los tipos de circos y las variables ambientales (altitud, exposición y litología) refleja que los circos de Tipo 1 tienen preferencia por el flysch y las altitudes bajas, mientras los de Tipo 4 tienden a localizarse más sobre granitos. Los circos de Tipo 2 se asocian más con las pizarras y los circos de Tipo 3 con las areniscas.

Finalmente, la Tabla 10 expresa el test de autoclasificación de aciertos del Análisis Discriminante (adecuación de los grupos observados con los predichos). En ella se observa que el 53.6% de los circos glaciares han sido clasificados correctamente por el Análisis Discriminante, siendo los del tipo 1 (61.9%) y tipo 2 (54.1%) los mejor clasificados. Este resultado confirma que aproximadamente el 50% de la morfometría de los circos glaciares debe explicarse por los condicionantes ambientales tratados. El 50% restante se explica por otros factores que aquí no han sido considerados, fundamentalmente los relacionados con el relieve preglaciar y con la estructura geológica.

5. Discusión y conclusiones

Los circos glaciares del Pirineo Central español se localizan en un amplio rango de altitudes y exposiciones y se han desarrollado en todo tipo de litologías, a condición de que la línea divisoria situada por encima del circo alcance al menos los 2000 m s.n.m. El frente de los circos más bajos (lugar donde se ubica el umbral de circo o punto más externo del mismo) se sitúa en torno a 1700-1800 m s.n.m., altitud que coincidiría, según diversos autores (Trenhaile, 1976; Embleton & Hamann, 1988; Hamann & Embleton, 1988), con la línea de nieves permanentes (*snowline*), entendiéndose por tal la hipotética línea divisoria entre el área de acumulación de un glaciar y el área de ablación. Esta línea es, como ya habían apuntado otros autores hace ya varias décadas (Penck, 1883) sensiblemente más alta en el Pirineo Central que en otras montañas más occidentales, debido a la mayor continentalidad de la cordillera Pirenaica en su sector central. Así,

Tabla 9. Centroides de los tipos de circos en las funciones discriminantes.
Centroids of the cirque patterns in the discriminant

Grupos	Función		
	1	2	3
1	-.943	-.284	-.505
2	.961	.134	-.681
3	-.009	-.186	.159
4	-.219	.775	-.008

Tabla 10. Tabla de clasificación correcta entre tipos de circos observados y predichos por el Análisis Discriminante.
Table of correct classification between patterns of glacial cirques observed and predicted by Discriminant Analysis.

	Grupos Observados	Grupo de pertenencia pronosticado				Totales
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	
Casos	Tipo 1	13	1	7	0	21
	Tipo 2	0	8	6	3	17
	Tipo 3	22	10	66	24	122
	Tipo 4	7	3	7	17	34
Porcentajes	1	61.9	4.8	33.3	.0	100.0
	2	.0	47.1	35.3	17.6	100.0
	3	18.0	8.2	54.1	19.7	100.0
	4	20.6	8.8	20.6	50.0	100.0

Alonso (1994) sitúa la línea de nieves permanentes en el tramo asturiano de la Cordillera Cantábrica hacia 1400-1500 m. Dentro del Pirineo Central no resulta sencillo encontrar variaciones altitudinales de la línea de nieves permanentes durante el máximo glaciario, en gran parte por la propia heterogeneidad del relieve pirenaico. Sin embargo, puede deducirse una progresiva elevación de la línea de nieve de oeste a este dentro del área de estudio a partir de la localización de los frentes glaciares: Martí Bono (1996), García Ruiz & Martí Bono (1994) y Chueca *et al.* (1998) muestran que las lenguas glaciares principales finalizaban a una altitud muy similar (en torno a 830 m), como sucede en los valles de Hecho, Aragón y Gállego. Dado que el relieve se eleva claramente hacia el este, puede suponerse que los valles occidentales tenían mayor innivación y que su línea de nieves permanentes estaría probablemente a menor altitud.

Una cuestión interesante es que los circos glaciares se han desarrollado en cualquier exposición, incluso en las teóricamente más desfavorables. Cierto es que hay mayor número de circos orientados al norte, cuyo número aún sería superior de haberse incluido la vertiente norte de la divisoria con Francia, pero también son muchos los orientados al sur y un porcentaje próximo al 10% de los circos están orientados al oeste o al suroeste. Esto sugiere que en macizos montañosos con un gran desarrollo altitudinal la exposición no es un factor limitante, pues en los relieves más elevados incluso la orientación sur recibe suficiente innivación y presenta balance positivo de acumulación anual de nieve. De hecho, en la Cordillera Cantábrica Alonso (1994) observa que en las áreas más elevadas la orientación es muy dispersa, mientras que en macizos menos elevados del Sistema Ibérico (Demanda, Cebollera, Moncayo) las exposiciones norte y nordeste dominan claramente sobre las demás (García Ruiz, 1979; Ortigosa, 1986; García Ruiz *et al.*, 1997). Por ello, al menos en parte, la exposición de los circos está controlada por la disposición del relieve pirenaico, con frecuentes alineaciones oeste-este que favorecen una mayor presencia de circos orientados al norte y al sur (Serrano, 1998). Además hay que tener en cuenta que las exposiciones norte y nordeste son consideradas óptimas en las latitudes medias (Seddon, 1957; Temple, 1965; Unwin, 1973; Trenhaile, 1975), pero es importante recordar que la mayor o menor presencia relativa de circos en estas exposiciones depende de la disposición general del relieve, de su desarrollo altitudinal y de la dirección de los vientos dominantes.

Este trabajo ha demostrado que algunas variables geoambientales (altitud, exposición y litología) influyen en la forma y tamaño de los circos glaciares pero su grado de control sobre éstos es bastante limitada.

De acuerdo con el Análisis Discriminante, estas variables explican aproximadamente el 50% de las características morfológicas. El resto estaría condicionado por factores tales como la presencia de fallas, la disposición de los estratos, la erosión diferencial y ciertos rasgos (difícilmente definibles) del relieve preglaciar (Martínez de Pisón & Arenillas, 1976; Unwin, 1973; Serrano, 1998). De hecho, la diversidad de formas y la ausencia clara de determinaciones en las relaciones (bimodales o multivariadas) entre factores y parámetros morfológicos indicaría que los circos glaciares están muy condicionados en su desarrollo por formas iniciales diferentes (ver también Evans & Cox, 1995, p. 200).

Sin embargo, algunas relaciones son evidentes. Así, la altitud influye en cierta medida sobre la longitud de los circos, y, por lo tanto, sobre su relación longitud/anchura. En altitudes bajas los circos son claramente más anchos que largos, mientras que en las proximidades de las cumbres más elevadas la anchura y la longitud tienden a equipararse. Esta tendencia sugiere que el aumento de la longitud es un signo de madurez o de larga evolución de los circos, como lo confirma el hecho de que los más elevados —es decir, los que han soportado un período de glaciación más prolongado— son también los más largos. En otras palabras, con el tiempo, tiende a aumentar más la longitud que la anchura de los circos (ver también Derbyshire & Evans, 1976; Gordon, 1977), de manera que en un principio los circos serían relativamente anchos, pero simplemente adosados a la pared como una pequeña excavación (circos en sillón).

En menor medida, la altitud influye también sobre el encajamiento de los circos, expresado en la relación longitud/desnivel (L/H). Esta relación no es muy alta en el área de estudio, lo que para Embleton & King (1968) refleja una cierta inmadurez en el desarrollo del circo. Esta idea explicaría el incremento de este índice con la altitud. Sin embargo, no todos los autores estarían de acuerdo con esta sugerencia; así, Evans & Cox (1995) consideran que la altitud tiene un efecto morfológico reducido, limitándose su papel —como el de la orientación— a controlar más la distribución que la forma o el tamaño de los circos.

El papel de la litología es, en el Pirineo Central español, menos evidente. Es cierto que los circos sobre granitos son más extensos y más largos, mientras que en el flysch son pequeños, cortos y con una baja relación L/A; pero no es menos cierto que en este trabajo tales resultados no han podido independizarse totalmente del efecto de la altitud. Aun así, tanto la fotografías aéreas como el trabajo de campo insisten en la forma más acabada, con formas más redondeadas o incluso alargadas de los circos sobre los granitos, donde los circos se hallan perfectamente sobreexcavados y encajados en el marco morfoestructural. A altitudes similares, las calizas, las cuarcitas o las areniscas, arcillas y conglomerados del Permotrias apenas incluyen ejemplos tan evolucionados de circos glaciares, lo que justifica la importancia dada por otros autores a la litología (Vilborg, 1984; Alonso, 1994).

Agradecimientos

Este trabajo se ha elaborado con el apoyo financiero del Proyecto «Water resources management in a changing environment: the impact of sediment on sustainability» (WARMICE, ENV4-CT98-0789), financiado por la Comisión Europea.

Referencias bibliográficas

- Alonso, V.** (1994): Análisis de los circos glaciares en las cabeceras de los ríos Narcea, Ibias y Sil. Cordillera Cantábrica (NW de la Península Ibérica). *Cuaternario y Geomorfología*, 8 (1-2): 109-121.
- Aniya, M. & Welch, R.** (1981): Morphometric analysis of Antarctic cirques from photogrammetric measurements. *Geografiska Annaler*, 63A (1-2): 41-53.
- Barrère, P.** (1952): Le relief des massifs granitiques de Néouvielle, de Cauterets et de Panticosa. *Rev. Géogr. Pyr. S.O.*, 23(2): 69-98.
- Barrère, P.** (1966): La morphologie quaternaire dans la région de Biescas et de Sabiñánigo (Haut Aragon). *Bull. Ass. Fr. Et. Quat.*, 1966 (2): 83-93.
- Barrère, P.** (1971): *Le relief des Pyrénées Centrales Franco-espagnoles. Cartes géomorphologiques*. 12 mapas a escala 1: 50.000. Institut de Géographie de l'Université de Bordeaux.

- Bennet, M.** (1990): The cwms of snowdonia: a morphometric analysis. *Res. Paper*, 2: 48 pp., Queen Mary & Westfield College, Dept. of Geography, London.
- Chueca, J., Peña, J.L., Lampre, F., García Ruiz, J.M. & Martí Bono, C.** (1998): *Los glaciares del Pirineo aragonés: Estudio de su evolución y extensión actual*. Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza, 104 pp., Zaragoza.
- Derbyshire, E. & Evans, I.S.** (1976): The climatic factor in cirque variation. In E. Derbyshire, ed. *Geomorphology and climate*, Wiley & Sons, pp. 447-494, Chichester.
- Embleton, C. & Hamann, C.** (1988): A comparison of cirque forms between the Austrian Alps and the Highlands of Britain. *Z. Geomorph. N.F.*, Suppl. 70: 75-93.
- Evans, I.S.** (1977): World-wide variations in the direction and concentration of cirque and glacier aspects. *Geografiska Annaler*, 59A (3-4): 151-175.
- Evans, I.S. & Cox, N.J.** (1995): The form of glacial cirques in the English Lake District, Cumbria. *Z. Geomorph. N.F.*, 39(2): 175-202.
- García Ruiz, J.M.** (1979): El glaciario cuaternario en la Sierra de la Demanda. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 5(2): 3-25.
- García Ruiz, J.M.** (1991): *Mapa geomorfológico. Sallent*. Geoforma Ediciones, 29 pp. y un mapa a escala 1: 50.000, Logroño.
- García Ruiz, J.M. & Martí Bono, C.** (1994): Rasgos fundamentales del glaciario cuaternario en el Pirineo aragonés. In C. Martí Bono & J.M. García Ruiz, eds.: *El glaciario surpirenaico: Nuevas aportaciones*. Geoforma Ediciones, pp. 17-32, Logroño.
- García Ruiz, J.M., Ortigosa, L., Arnáez, J. & Pellicer, F.** (1997): Geomorfología glacial del Sistema Ibérico. En A. Gómez Ortiz & A. Pérez Alberti, Eds.: *Las huellas glaciares de las montañas españolas*. Universidad de Santiago de Compostela, pp. 349-381, Santiago de Compostela.
- García Ruiz, J.M., Peña, J.L., Martí Bono, C. & Gómez Villar, A.** (1994): *Mapas geomorfológicos de Ansó, Zuriza, Jaca, Sallent y Biescas*. Mapas inéditos a escala 1: 50.000, Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza.
- Gordon, J.E.** (1977): Morphometry of cirques in the kintail-Affric-Cannich area of northwest Scotland. *Geografiska Annaler*, 59A(3-4): 177-194.
- Hamann, C. & Embleton, C.** (1988): Morphometrische Analyse der kare in den Salzburger Zentralalpen. *Salzburger Geographische Arbeiten*, 17: 57-74.
- Manley, G.** (1959): The late-glacial climate of north-west England. *Liverpool and Manchester Geol. J.*, 2: 188-215.
- Martí Bono, C.** (1996): *El glaciario cuaternario en el Alto Aragón Occidental*. Tesis Doctoral, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, 254 pp., Barcelona.
- Martínez de Pisón, E.** (1989): Morfología glacial del valle de Benasque (Pirineo aragonés). *Ería*, 18: 51-64.
- Martínez de Pisón, E. & Arenillas, M.** (1976): El problema de la sobreexcavación glacial, arrancamiento, abrasión y estructura. *Estudios Geográficos*, 145: 407-434.
- Martínez de Pisón, E. & Antón, J.** (1981): Repertorio bibliográfico sobre morfología glacial de la Península Ibérica. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 7: 3-50.
- Martínez de Pisón, E.** (1996): *El valle de Tena. Un paisaje modelado por el hielo*. Departamento de Agricultura y Medio Ambiente, Gobierno de Aragón, 158 pp., Zaragoza.
- Ortigosa, L.** (1986): *Geomorfología glacial de la Sierra Cebollera (Sistema Ibérico)*. Instituto de Estudios Riojanos, 77 pp., Logroño.
- Panzer, W.** (1948): El desarrollo de los valles y el clima de la época cuaternaria en el NE de España. *Estudios Geográficos*, 30: 79-130.
- Penck, A.** (1883): La période glaciaire dans les Pyrénées. *Bulletin Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 19: 105-200.
- Rapp, A.** (1984): Nivation hollows and glacial cirques in Söderasen, Scania, South Sweden. *Geografiska Annaler*, 66 A (1-2): 11-28.
- Rudberg, S.** (1984): Fossil glacial cirques or cirque problematica at lower levels in northern and central Sweden. *Geografiska Annaler*, 66A (1-2): 29-39.

- Seddon, B.** (1957): Late-glacial cwm glaciers in Wales. *Journal of Glaciology*, 3(22): 94-99.
- Serrano, E. & Martínez de Pisón, E.** (1994): Geomorfología y evolución glaciaria en el Pirineo aragonés. En C. Martí Bono & J.M. García Ruiz, Eds.: *El glaciario surpirenaico: Nuevas aportaciones*. Geoforma Ediciones, pp. 33-64, Logroño.
- Serrano, E.** (1998): *Geomorfología del Alto Gállego, Pirineo aragonés*. Institución Fernando el Católico, 501 pp., Zaragoza.
- Soler, M. & Puigdefábregas, J.** (1972): Esquema litológico del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 106: 5-15.
- Temple, P.H.** (1965): Some aspects of cirque distribution in the westcentral Lake District, northern England. *Geografiska Annaler*, 47A (3): 185-193.
- Trenhaile, A.S.** (1975): Cirque elevation in the Canadian Cordillera. *Ann. Ass. Am. Geogr.*, 65(4): 517-529.
- Trenhaile, A.S.** (1976): Cirque morphometry in the Canadian Cordillera. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 66: 451-462.
- Unwin, D.J.** (1973): The distribution and orientation of corries in northern snowdonia, Wales. *Trans. Inst. Brit. Geogr.*, 58: 85-97.
- Vilborg, L.** (1984): The cirque forms of Central Sweden. *Geografiska Annaler*, 66 A (1-2): 41-77.

Recibido el 20 de Febrero de 1999

Aceptado el 5 de Mayo de 1999