

Cuadernos de Investigación Geográfica	2004	Nº 30	pp. 85-116	ISSN 0211-6820
---------------------------------------	------	-------	------------	----------------

© Universidad de La Rioja

## INTERRELACIÓN NIEVE / GEOMORFOLOGÍA EN LA SIERRA DE GUADARRAMA: ALTAS CUENCAS DEL VENTISQUERO DE LA CONDESA Y VALDEMARTÍN.

**N. ANDRÉS DE PABLO  
D. PALACIOS ESTREMER**

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física.  
Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense. Madrid 28040.

Correo electrónico de contacto: nuriand@ghis.ucm.es

*RESUMEN. La finalidad del presente trabajo es relacionar las formas del relieve con la distribución de la nieve y su permanencia sobre el suelo a lo largo del año en las altas cuencas del Ventisquero de La Condesa y Valdemartín. El área de estudio queda delimitada por las divisorias de dos torrentes, Condesa y Valdemartín, en el nacimiento del río Manzanares, donde la cumbre culminante es Cabeza de Hierro Menor (2.373 m, 40° 47' 56" N y 3° 56' 10" W) y la cota más baja queda aguas debajo de la confluencia de los dos arroyos (1.795 m, 40° 46' 32" N y 3° 57' 15" W). Para cumplir este objetivo, se han cartografiado las unidades geomorfológicas sobre el ortofoto digital de 1998 (CAM) y se han obtenido series temporales de mapas de la distribución de la nieve a partir de fotos semanales realizadas desde 1996 hasta 2004. Toda esta información se ha almacenado y tratado en un Sistema de Información Geográfica, el programa ArcGis. Con esta metodología se ha elaborado un mapa de permanencia de la nieve en el suelo para el periodo de estudio y se ha relacionado estadísticamente con el geomorfológico y con los principales datos topográficos de las cuencas: altitudes, pendientes y orientaciones. Los resultados indican que las áreas menos nivadas coinciden con las formas del relieve más antiguas. Cuando se supera el umbral de 220 días al año de permanencia de nieve en el suelo, la actividad geomorfológica nival se desencadena. En las últimas décadas, antiguos nichos nivales han cesado en su dinámica al descender el número de días de nieve en su suelo por debajo de ese umbral. Las incisiones torrenciales y la formación de canales por movimientos en masa crean nuevas áreas de acumulación nival.*

*ABSTRACT. This article examines the relationship between landforms and yearly snow distribution and permanence. A study site was chosen near the source of the Manzanares River in the watersheds of two mountain streams, Condesa and Valdemartin, that converge at the lowest spot height (1,795 m, 40° 46' 32" N and 3° 57' 15" W) on Cabeza de Hierro Menor Peak (2,373 m,*

40° 47' 56" N and 3° 56' 10" W). The mapping of geomorphologic units and weekly photographing of snow distribution from 1996 to 2004 provided data to map snow covered areas. ArcGis software was used to process information and produce a map of snow permanence for the study period. The methodology also provided a means of statistically relating this map to the geomorphology, elevations, slopes and watershed orientations. The results indicate that the areas of minimum snow cover coincide with the oldest landforms. Geomorphologic activity associated with snow processes is set in motion once snow permanence exceeds the 220 days/yr threshold. In recent decades, the activity in old snow hollows ceased as the number of days of snow permanence dropped below this limit. The incisions cut by stream action and the formation of channels caused by mass movement create new areas of snow accumulation.

**Palabras clave:** Nieve, Sistema de Información Geográfica (SIG), Cartografía geomorfológica, Río Manzanares, España.

**Key words:** Snow, Geographic Information System (GIS), Geomorphological Cartography, Manzanares river, Spain.

*Enviado en Octubre de 2004*

*Aceptado en Noviembre de 2004*

## 1. Introducción

El significado geomorfológico y la capacidad erosiva de la nieve permanece bajo un intenso debate por la comunidad geomorfológica internacional, como muestran las últimas publicaciones sobre el tema (Darmody *et al.*, 2000; Thorn y Hall, 2002). Trabajos realizados en la sierra de Guadarrama recientemente (Palacios y García, 1997 a y b; Palacios y Andrés, 2000; Palacios *et al.*, 2003a; Palacios *et al.*, 2004) indican que existe en estas montañas una relación directa entre la prolongada e intensa acumulación nival y los procesos más activos del área de cumbres, siempre y cuando esta acumulación sea sobre materiales sueltos: morrenas, manto de alteración y campos de bloques periglaciares.

El problema científico sobre la capacidad de la nieve para modelar el relieve se plantea a principios del siglo XX (Matthes, 1900), inicialmente, como un problema morfológico: explicar el origen de la formación de nichos, a partir de los cuales se puedan llegar a desarrollar circos glaciares. Propuesto por el propio Davis (1906) y desarrollado por uno de sus discípulos (Hobbs, 1910), la acción nival era el primer paso en una cadena de procesos, donde la apertura o ampliación de una depresión aumentaba la capacidad de ésta para retener la nieve y, por tanto, se incrementaba el tamaño del helero o glaciar y la intensidad de los procesos erosivos, que a su vez aumentaban la depresión.

Con St-Onge (1969) y Thorn (1976) se inicia una nueva línea, mucho más experimental, que trata de conocer y evaluar los posibles procesos erosivos y de transporte que están, directa o indirectamente, relacionados con la nieve. La corriente anterior se abandona dentro del campo puramente científico, pero se mantiene en el docente. Es decir, mientras se multiplican las publicaciones sobre experimentos y monitorización de pro-

cesos erosivos en áreas nivales, deja de considerarse por completo la morfología nival y su posible sistema evolutivo. Sin embargo, los resultados de estos análisis son muy parciales, incluso a veces contradictorios, y no permiten llegar a la elaboración de leyes generales o al establecimiento de hipótesis más globales. Por este motivo, curiosamente, en la gran mayoría de los manuales de geomorfología, al tratar a la nieve como agente, se siguen exponiendo los viejos principios daivisianos, de carácter puramente morfológico.

Quizás los escasos logros obtenidos, al menos universalmente aceptados, después de 30 años de experimentación en áreas nivales, haya hecho el proponer actualmente una vuelta al análisis morfológico, sin abandonar por su puesto el análisis experimental (Christiansen, 1996 y 1998; Thorn y Hall, 2002). Precisamente, identificar diferentes formas nivales, establecer hipótesis sobre su origen y proponer diversas fases evolutivas entre las mismas, podrá permitir realizar experimentos mejor enfocados y mucho más útiles en el avance científico.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es conocer la diversidad de formas nivales que se pueden dar en una montaña media, como la Sierra de Guadarrama, con altitudes máximas que no alcanzan los 2.500 m y en una vertiente poco propicia para la acumulación nival, como es la meridional (Fig. 1). El trabajo pretende conocer si hay una preferencia en la localización de estas formas según la altitud, la pendiente de la ladera o su orientación.

El área de estudio seleccionada es el nacimiento del río Manzanares y, más en concreto, las cuencas de sus dos afluentes iniciales: el arroyo de La Condesa y el de Valdemartín (Fig. 2). La cuenca de La Condesa está comprendida entre las cumbres de

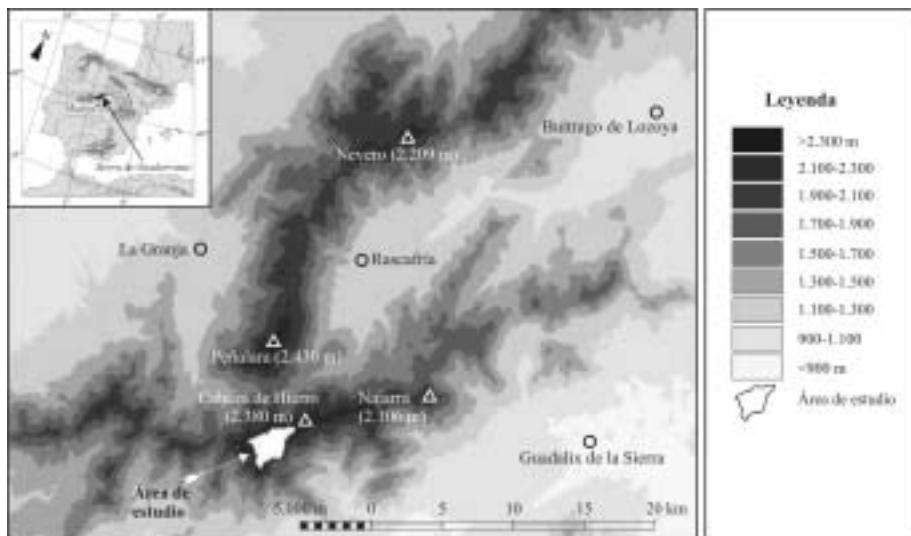


Figura 1. Localización de la cuenca Ventisquero de La Condesa / Valdemartín, objeto de estudio en este trabajo, en el ramal septentrional de la Sierra de Guadarrama.



*Figura 2. Ortofoto, con mapa topográfico superpuesto, del área de estudio: Cuencas del Ventisquero de La Condesa y Valdemartín, Sierra de Guadarrama, provincia de Madrid.*

la Maliciosa (2.227 m; 40° 46' 10" N y 3° 58' 00" W), límite meridional del área de estudio; el Alto de las Guarramillas (2.258 m; 40° 47' 10" N y 3° 58' 35" W), extremo occidental; y el Cerro de Valdemartín (2.282 m; 40° 47' 40" N y 3° 57' 40" W) (Fig. 3.a). La cuenca de Valdemartín está enmarcada entre esta última cumbre y la de la Cabeza de Hierro Menor (2.373 m, 40° 47' 56" N y 3° 56' 10" W), altitud máxima del área de estudio y su extremo oriental (Fig. 3.b).

Para alcanzar el objetivo previsto, se ha realizado una cartografía geomorfológica basada en las observaciones de campo y en los criterios tradicionales. Además, con la fotografía digital obtenida desde 1996 hasta 2004 de toda el área durante la estación nival, se han elaborado series cartográficas de distribución de la nieve a partir de las que se ha generado un mapa de días de permanencia nival para el periodo de estudio. Los mapas de duración de la nieve y geomorfológico se han relacionado estadísticamente



*Figura 3. a. Foto de la vertiente oriental de la Cuenca del Ventisquero de La Condesa y Alto de las Guarramillas (2.258 m), desde el Cerro de Valdemartín (2.276 m) en junio de 2003. La mayor parte de esta vertiente está intensamente afectada por la erosión nival. En primer plano se observa el único nicho nival de la vertiente sur-occidental de la misma cuenca, localizado en la pared oriental del canal del Arroyo del Cuerno.*

entre sí y por separado con las altitudes, pendientes y orientaciones, en un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.)

## **2. Geomorfología nival**

Las cuencas de La Condesa y Valdemartín presentan grandes similitudes geomorfológicas entre sí, debido a su común apertura hacia el sur, de tal manera que en ambas se observa la misma disimetría entre sus vertientes orientales y occidentales. La mayor parte de la superficie aparece cubierta por los afloramientos de un manto de alteración que afecta tanto a las rocas gneísicas como a las graníticas, que componen fundamentalmente el substrato. Pero este manto de alteración, que según se ha observado en diversas incisiones posee un espesor entre 20 a 350 cm, tiene una composición arenosa y es fácilmente erosionable. De hecho, el manto ha sido parcialmente destruido o transformado. En las vertientes orientales el manto de alteración aparece ampliamente desmantelado y el relieve muestra, en ambas cuencas, una serie de formas nivales característi-



*Figura 3.b. Foto de la vertiente sur-occidental de la Cuenca del A° de Valdemartín y Cabeza de Hierro Menor (2.373 m) desde el Cerro de Valdemartín en junio de 2003. En contraste con las vertientes orientales, ésta destaca por la regularidad de sus formas, a excepción de algunos canales ligeramente remodelados por la acción nival.*

cas de la sierra de Guadarrama (Fig. 3.a). Por el contrario, en las vertientes occidentales se conserva mayoritariamente el manto de alteración y únicamente ha sido afectado, ocasionalmente, por procesos de remoción en masa e incisiones torrenciales (Fig. 3.b). En las escasas superficies que dentro del área de estudio tienen una orientación septentrional, los procesos periglaciares han transformado el manto de alteración, como suele ser habitual en la Sierra.

Para poder estudiar con exactitud la localización de las formas según su altitud, pendiente, orientación y, sobre todo, su relación con la nieve, se ha realizado una cartografía geomorfológica en detalle. El levantamiento cartográfico se realizó inicialmente a una escala 1:5.000, usando como base cartográfica la proporcionada por la Comunidad de Madrid. Los criterios aplicados para delimitar las formas se han basado en el aspecto puramente morfológico. Únicamente se ha realizado un seguimiento de la movilidad del suelo en las áreas consideradas nivales, para comprobar su actividad, para lo cual se ha usado la técnica de los bloques señalados, con una metodología adaptada de Rapp (1960); Soutadé (1980); y Rapp y Nyberg (1988) y experimentada en esta Sierra por

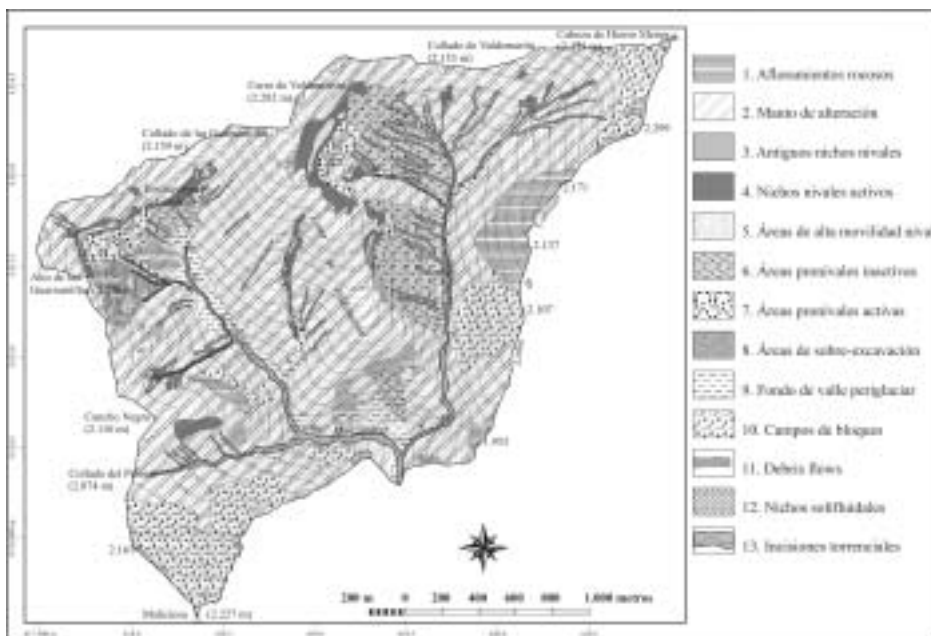


Figura 4. Mapa geomorfológico de la cuenca Ventisquero de La Condesa / Valdemartín.

Palacios y García (1997a); y Palacios *et al.* (2003a y 2004). En estas áreas se ha señalado un bloque en una retícula de 10 m de lado y registrado su desplazamiento una vez al año, durante el periodo 1996/2004.

De esta manera, se han distinguido 13 tipos de formas diferentes (Fig. 4). En primer lugar, se han cartografiado los afloramientos rocosos sin diferenciar su origen. La mayor parte de estos afloramientos son *tors*, localizados principalmente en las crestas y lomos de los interfluvios. En este orden también se ha incluido la pared rocosa bajo el Alto de las Guarramillas, si bien ésta podría tener un origen en la excavación glacial o protoglacial. En su base no se han encontrado morrenas, pero la abundancia de rocas aborregadas induce a pensar en esta posibilidad. Esta unidad en su conjunto ocupa el 8% del área de estudio, mientras que las formas cartografiadas como manto de alteración suponen el 57% del área y, como ya se ha destacado, dominan en las vertientes occidentales de las cuencas.

Las formas que se han considerado nivales ocupan el 15,4% del total del área de estudio, pero al ser el objeto principal de este trabajo se han dividido en dos grupos: las áreas puramente nivales (5,4% del total), cuya morfología es propia de los nichos de nivación y se debe al estacionamiento de neveros de larga duración; y las áreas pronivales (10% del total), situadas ladera abajo de los nichos anteriores y que han sido remodeladas por el prolongado aporte de agua desde ellos. Dentro de los nichos de nivación,



*Figura 5. a. Foto de un nicho nival en la vertiente sur-oriental del Cerro de Valdemartín (2.282 m), que adopta la clásica forma en “ceja”, en junio de 2003. En el nicho se diferencian las tres bandas características de una terraza de nivoplanación: la franja superior donde aflora el manto de alteración en proceso de desmantelamiento; una central formada por un rellano donde aflora la roca fresca y una franja más baja, donde se forman importantes coladas de soliflucción pronival.*

se han diferenciado entre: nichos no activos (0,9% del total del área), donde, para un periodo de 5 años, se han removido menos del 25% de los bloques señalados; nichos activos (3,9 %), donde se han removido entre el 25 y el 80% de los bloques; y áreas de máxima actividad (0,6%), donde se han removido más del 80 % de los bloques en los citados 5 años. Estas áreas se sitúan siempre en el interior de los nichos. Dentro de la áreas pronivales, se han diferenciado entre las inactivas (7,8% del total) y las activas (2,2%), siguiendo el mismo criterio que en los nichos.

En los nichos de nivación diferenciados en el área de estudio se han podido distinguir las tres variantes morfológicas observadas en otras áreas de la Sierra (Palacios *et al.*, 2004). Los de mayor extensión son los que forman extensas terrazas de nivoplanación, que en la Sierra se denominan “cejas” (Fig 5.a). Se desarrollan de forma continuada en las vertientes surorientales y orientales de las dos cuencas, llegando a constituir un pasillo sin interrupción, perpendicular a la pendiente. Este pasillo en el Ventisquero de La Condesa tiene casi 1 km de longitud y en Valdemartín casi 500 m. En ambos casos su





Figura 5. b. Foto de un nicho nival en la cabecera de un arroyo, bajo el Cacho Negro (2.116 m), en forma de “hoyo”, en junio de 2003. Obsérvese la disimetría de la actividad erosiva nival, localizada únicamente en las vertientes orientales de dicha cabecera.

anchura máxima se encuentra próxima a los 100 m. En estas dos terrazas de nivoplanaación se distinguen las mismas unidades: una franja superior donde aflora el manto de alteración en proceso de dismantelamiento, y una franja inferior, llana o de suave pendiente, donde aflora la roca fresca. Bajo esta última franja se desarrollan las principales áreas pronivales. Las áreas de máxima movilidad nival se localizan en el interior de la franja superior, normalmente en su sector intermedio. Las áreas pronivales, aunque como se ha visto anteriormente en su mayoría son inactivas, están compuestas fundamentalmente de alargadas coladas de soliflucción, que se intercalan y mezclan unas con otras y que descienden hasta el fondo de los valles.

Además de las “cejas”, se han diferenciado también nichos de nivación localizados en las cabeceras de canales de torrentes o de *debris flows*. Localmente reciben el nombre de “hoyos” y se distinguen por estar excavados únicamente en los sectores de las cabeceras más favorables a la acumulación nival, es decir, con una orientación oriental (Fig. 5.b). Por este motivo, las cabeceras aparecen claramente deformadas en una de sus laderas, resultando una morfología disimétrica. En muchas ocasiones, el retroceso de un sector de la cabecera ha permitido la coalescencia con la cabecera anexa y de ésta con la siguien-

te, llegando a generarse formas intermedias entre estos hoyos y las cejas descritas anteriormente. Buenos ejemplos de estas disimetrías y, en su caso, de coalescencias, se encuentran bajo los collados del Piornal, Cancho Negro, las Guarramillas y Valdemartín.

También se han delimitado nichos de nivación situados a lo largo de canales. Estos nichos, longitudinales a la pendiente, se identifican porque los canales aparecen deformados sólo en uno de sus lados, el más favorable a la acumulación nival. Esta ladera se encuentra retranqueada y muy suavizada, mientras que la otra permanece intacta. Los nichos sobre canales se pueden dar en vertientes muy poco propicias a la acumulación nival, como es la occidental, siempre que una de las laderas del canal tenga una orientación oriental o suroriental. Excelentes ejemplos de esta morfología son los nichos localizados en las laderas surorientales del arroyo de la Cuerna, en la vertiente occidental de La Condesa, o del arroyo que desciende de Cabeza de Hierro Menor, en la vertiente occidental de Valdemartín.

Algunas depresiones situadas entre umbrales rocosos de la pared bajo el Alto de las Guarramillas, se han clasificado como depresiones de sobre-excavación (0,6 % del área total), sin entrar a considerar si esta fue glaciario o nival, ya que no es el objeto de este trabajo. Dentro de las formas periglaciares, se han distinguido dos: los fondos planos de los valles (3,8% del área total), comunes en las dos cuencas, rellenados claramente en periodos fríos, donde las corrientes de agua no tenían capacidad de transporte, y los campos de bloques de las áreas cimera (10,6% del total del área). Estos últimos se localizan en la ladera de la Maliciosa, la única que tiene una orientación claramente septentrional, y en algunos sectores de la vertiente occidental de la Loma de Cabezas, en este caso siempre bajo grandes afloramientos rocosos. Los campos de bloques son muy similares a los de otros sectores de la Sierra (Palacios *et al.*, 2000), formados por grandes bloques, dispuestos en lóbulos, con bloques más pequeños y finos en su núcleo. En la base de este nivel de bloques aparece siempre el manto de alteración descrito anteriormente.

Dentro de las formas de ladera, tienen importancia morfológica las coladas de derrubios o *debris flows*, no por su extensión superficial (ocupan sólo un 2,4% de la superficie), si no por el papel que pueden suponer en la propia evolución de las laderas. Son abundantes en las áreas pronivales, donde cruzan y drenan las coladas de soliflucción. Aunque en menor proporción, también se encuentran en vertientes poco nevadas. Se diferencian de las incisiones torrenciales por no estar jerarquizados y por que su sistema de drenaje es deficiente. Aunque es evidente, que como en otras áreas del Sistema Central (Palacios *et al.*, 2003b), muchos de estos *debris flows* fueron capturados e incorporados a la red de drenaje. También se han localizado y delimitado algunos nichos solifluidales que no están relacionados con las áreas pronivales y que tienen una extensión mínima (0,1 % del área total). Por último, se consideran incisiones torrenciales los canales que se encuentran jerarquizados y que al menos son recorridos por corrientes de agua estacionales (2,1% del área total).

En definitiva, el área de estudio está ocupada en su gran mayoría por formas relacionadas cronológicamente con el manto de alteración: afloramientos del propio manto de alteración, *tors* y campos de bloques periglaciares, con una extensión del 75,6 % del total

de la superficie. Estas formas se pueden considerar pre-holocenas y seguramente bastante más antiguas, hasta del pleistoceno medio, según se ha defendido en otras publicaciones (Palacios *et al.*, 2003 b). Del 24,4% restante, que se pueden calificar como formas holocenas activas o semiactivas, el 63,1% (15,4% del total de la superficie) son nivales.

### 3. Acumulación y permanencia nival

Para comprobar la relación de las formas del relieve consideradas nivales con la acumulación nival, en contraste con las formas no nivales, se ha monitorizado la permanencia de la nieve en el suelo durante las temporadas nivales comprendidas entre 1996/1997 y 2003/2004, ambas inclusive. La monitorización se ha llevado a cabo mediante la toma de fotografías digitales oblicuas de las dos cuencas desde puntos clave, al menos una vez al mes y, durante las fases de deshielo hasta semanalmente. Las fotos se han corregido y georreferido sobre el Modelo Digital del Terreno proporcionado por la Comunidad de Madrid, el cual tiene una precisión de 5 m. Siguiendo una metodología adaptada de Daly (1984) y Watanabe (1988) y experimentada en esta Sierra anteriormente por Palacios y García (1997a); y Palacios *et al.* (2003a y 2004), se han tratado estadísticamente los mapas derivados de las fotos y se ha obtenido un mapa de permanencia de la nieve en el suelo para el periodo de estudio. El mapa divide la superficie en 10 categorías según el número de días que, como media, la nieve permanece en el suelo, desde menos de 60 días a más de 219 (Fig.6).

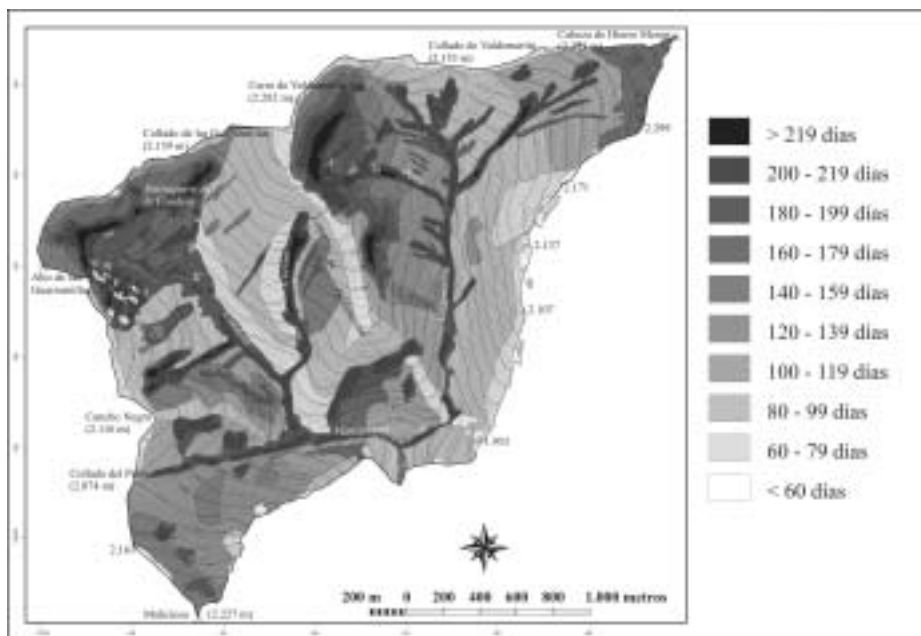
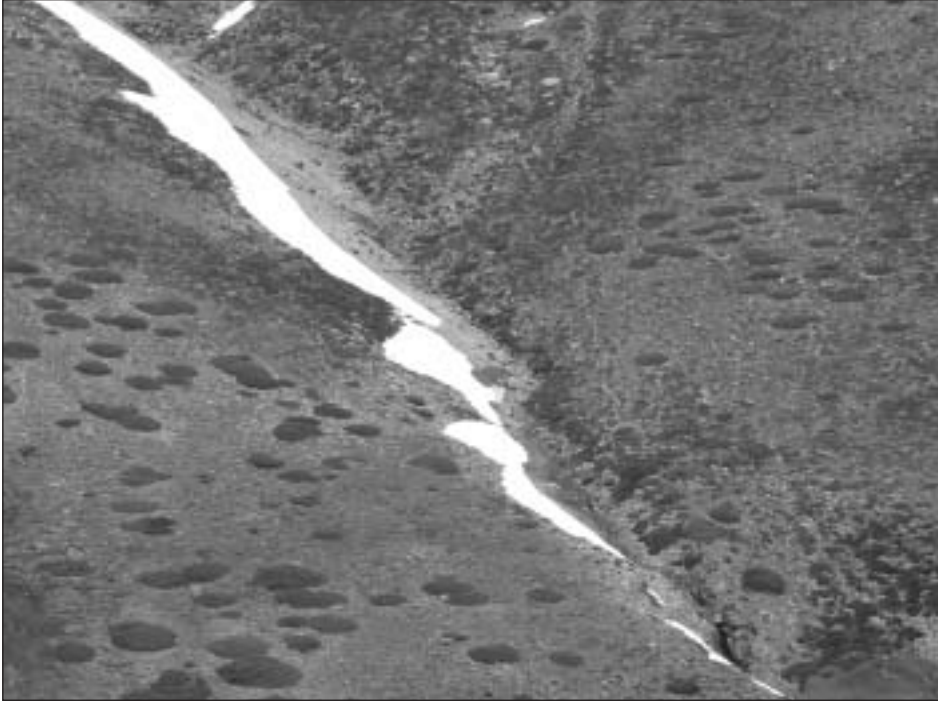


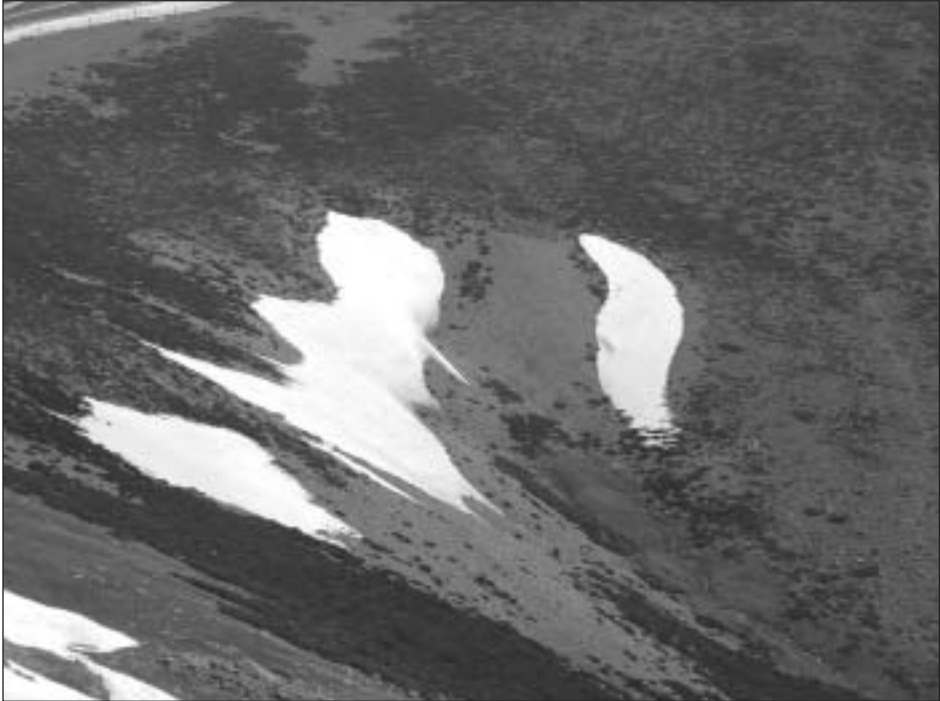
Figura 6. Mapa de permanencia de la nieve en la cuenca Ventisquero de La Condesa / Valdemartín. La leyenda indica el número de días de media que la nieve permanece en el suelo (periodo 1996-2004).



*Figura 7. a. Foto del sector final del Arroyo Alto, antes de su confluencia con el A° de Valdemartín en mayo de 2003. A pesar de que la vertiente tiene una orientación suroeste, la menos propicia para la acumulación nival, la nieve se acumula y persiste durante toda la primavera sólo en la vertiente suroriental del canal.*

Todos los periodos de permanencia de nieve establecidos aparecen representados en las superficies de las dos cuencas de forma bastante homogénea. Destaca por su mayor abundancia el de 80 a 99 días, que ocupa el 26 % del total. El segundo más abundante es el de 180 a 199 días, que ocupa el 15%. Los que tienen una menor extensión son los extremos, donde el de más de 219 días ocupa el 1,2 % y el de menos de 60 días el 1%. El resto de los periodos son muy homogéneos y se encuentran entre el 7%, para el de 160 a 179 días, y el 11%, para el periodo de 100 a 119 días.

El contraste entre el mapa geomorfológico y el de permanencia de la nieve podrá permitir observar la relación entre las formas del relieve y las áreas donde se acumula predominantemente la nieve y establecer en qué medida la nieve es el agente de la remodelación de las formas. Por ejemplo, si la nieve es capaz de crear una disimetría morfológica dentro de antiguos canales de *debris flows*, al acumularse fundamentalmente en una de sus laderas (Fig. 7.a), o si puede llegar a unir varias cabeceras y formar una ceja o terraza de nivoplanación a partir de varios antiguos hoyos nivales (Fig. 7.b).



*Figura 7. b. Foto de la vertiente meridional del Collado de las Guarramillas (2.159 m), cabecera del A° de La Condesa, en mayo de 2003. A pesar de la exposición meridional de la vertiente, la nieve se acumula en las laderas orientales de las cabeceras torrenciales. La acción nival ha provocado la coalescencia de las mismas, pasando de ser un serie de “hoyos” para llegar a formar una “ceja”.*

#### **4. Tratamiento en un Sistema de Información Geográfica de la distribución de las formas del relieve y la nieve**

El análisis de las relaciones existentes entre las formas de relieve, la duración de la nieve en el suelo y las características orográficas del área de estudio se ha llevado a cabo mediante un tratamiento espacial y estadístico con la herramienta SIG *ArcGis*.

La primera fase de la metodología aplicada consistió en el almacenamiento de la información en distintos niveles: datos geomorfológicos, de duración de la nieve y topográficos. La capa de información geomorfológica se obtuvo mediante la digitalización de las 13 categorías de formas diferentes (Fig. 4) explicadas anteriormente. La cartografía se realizó mediante técnicas de trabajo de campo y fotointerpretación y se trazó sobre una ortoimagen de 1998 proporcionada por la Comunidad de Madrid, de forma que la capa SIG quedó perfectamente corregida y referenciada sin ningún tratamiento adicional. El nivel de información referente a la duración de la nieve resultó de la aplicación

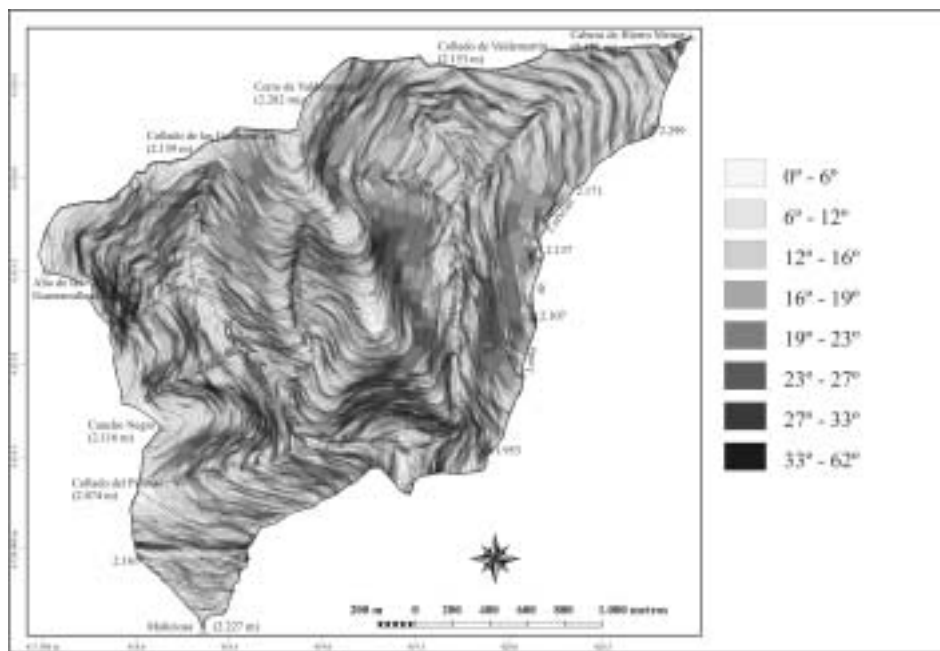


Figura 8. Mapa de pendientes (en grados) de la cuenca Ventisquero de La Condesa / Valdemartín distribuidas en rangos naturales (principales rupturas de pendientes) según el programa ArcGis.

de un tratamiento SIG temporal a un conjunto de capas obtenidas de la corrección y rectificación de las fotografías oblicuas (Fig. 6), como se ha explicado anteriormente.

Los datos topográficos se han extraído de la base cartográfica digital, en formato .dgn, proporcionada por la Comunidad de Madrid a escala 1/5.000. Se han empleado las capas con datos de alturas (curvas de nivel, cotas y puntos de apoyo) para la creación del TIN, del que se ha conseguido en formato raster la información de alturas, pendientes y orientaciones. Posteriormente, con el objeto de posibilitar las comparaciones y el análisis estadístico, se han reclasificado las diferentes capas. De esta manera, el rango de alturas comprendido entre los 1.795 y los 2.373 m se ha dividido en cuatro clases iguales y dos desiguales en los extremos. La inclinación del terreno medida en grados se ha clasificado en ocho categorías divididas por rupturas de pendiente –según el gráfico de distribución de la variable que ofrece ArcGis para elaborar un mapa de pendientes (Fig. 8), donde se nota que el 50% de la superficie de la cuenca tiene pendientes que oscilan entre 12 y 19°, el 2% posee inclinaciones inferiores a 6° y sólo el 1'28% presenta desniveles superiores a los 33°. Por último, las orientaciones se han distribuido en ocho clases de 45° cada una y se ha generado un mapa (Fig. 9) donde se observa que el 67'2% de la superficie de la cuenca Ventisquero de La Condesa-Valdemartín queda orientado entre el E y el SW y sólo un 1'1% se dispone hacia el NW.

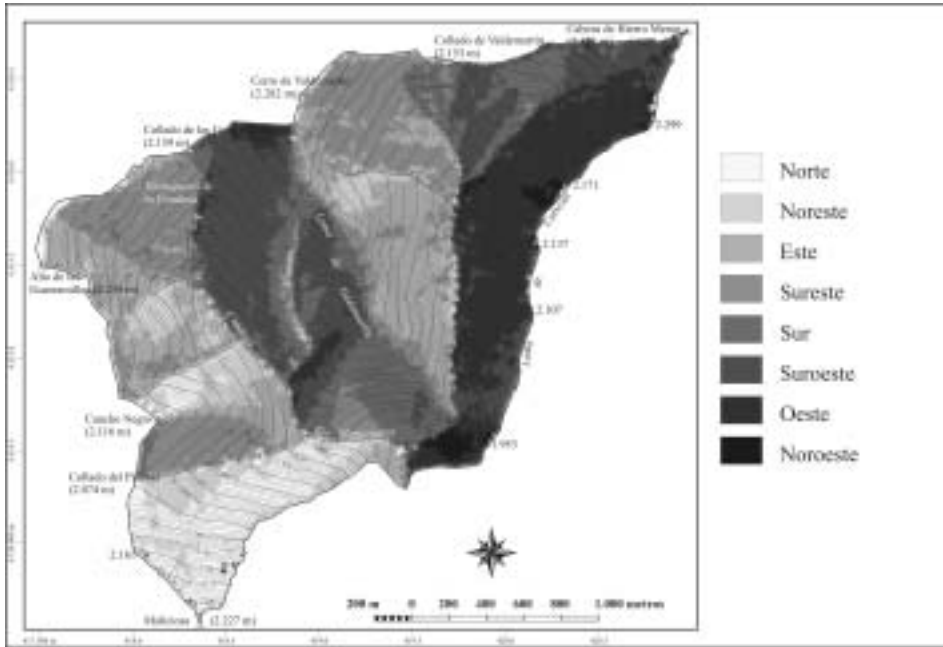


Figura 9. Mapa de orientaciones de la cuenca Ventisquero de La Condesa / Valdemartín.

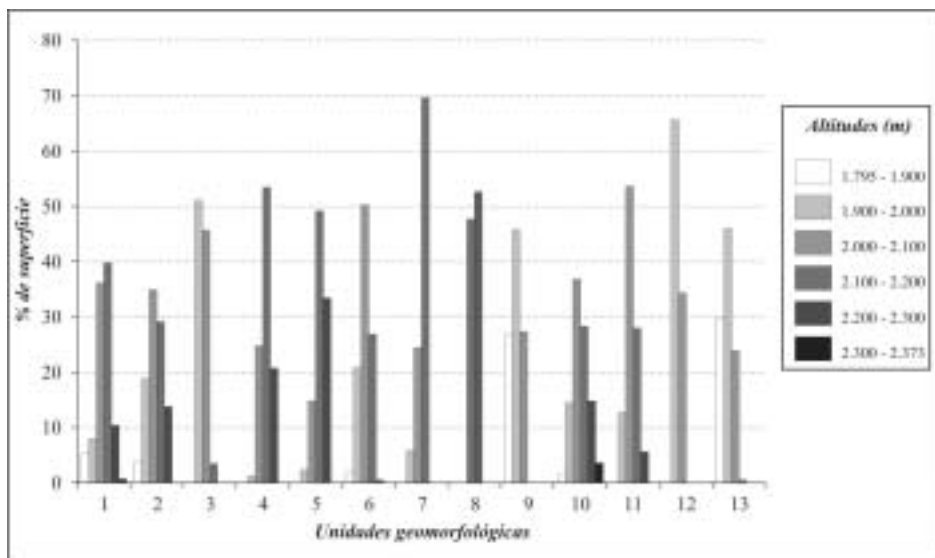
La segunda fase de la metodología se ha dedicado al análisis estadístico de las capas de información. El módulo *Spatial Analyst* de *ArcGis* permite realizar cálculos de superficies de las formas de relieve y de las categorías de permanencia de la nieve según la altitud, pendiente y orientación que presenten, de forma que se pueden localizar fácilmente los rasgos topográficos que caracterizan la máxima presencia o ausencia de determinada forma o de determinada duración nival. Las tablas numéricas obtenidas en las bases de datos del SIG se han expresado en gráficos para facilitar la interpretación.

Así mismo, se han superpuesto las cartografías geomorfológica y de permanencia de la nieve para realizar un análisis de las relaciones existentes entre estas dos variables.

## 5. Resultados (I). Relaciones entre las unidades del relieve y la orografía

### 5.a) Altitud

El área de estudio se encuentra comprendida entre los 1.795 m, aguas abajo de la confluencia de los dos drenajes principales, y los 2.373 m de la cumbre de Cabeza de Hierro Menor. En este rango de altitudes las formas de relieve se distribuyen espacialmente como se indica en la figura 10. De esta manera, se observa que entre 2.000 y 2.200 m de altitud se encuentra el 75% de los afloramientos rocosos y, aunque por encima de los 2.300 m su representación es muy escasa (0'6%), suponen el 11'5% de las áreas más



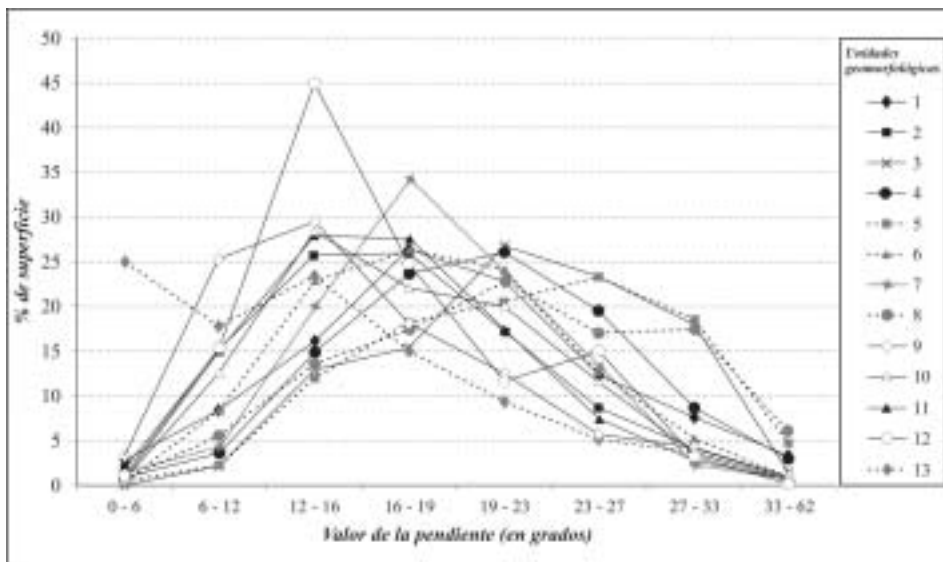
Altitudes (en metros)	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.795-1.900	5,24	3,61	0,00	0,00	0,00	1,97	0,00	0,00	26,93	1,60	0,00	0,00	29,84
1.900-2.000	7,87	18,97	<b>50,90</b>	1,11	2,41	20,68	5,77	0,00	<b>45,73</b>	14,70	12,68	<b>65,62</b>	<b>46,06</b>
2.000-2.100	<b>36,03</b>	<b>34,80</b>	45,61	24,74	14,97	<b>50,21</b>	24,52	47,49	27,34	<b>36,84</b>	<b>53,82</b>	34,38	23,90
2.100-2.200	<b>39,86</b>	28,85	3,49	<b>53,32</b>	<b>49,15</b>	26,79	<b>69,71</b>	<b>52,51</b>	0,00	28,37	27,79	0,00	0,19
2.200-2.300	10,40	13,77	0,00	20,84	33,46	0,35	0,00	0,00	0,00	14,95	5,71	0,00	0,00
2.300-2.373	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54	0,00	0,00	0,00

Figura 10. Porcentaje de superficie de cada una de las unidades geomorfológicas en cada uno de los rangos de altitud establecidos.

elevadas. El manto de alteración presenta su máxima extensión entre los 2.000 y los 2.100 m (34'8%), no tiene presencia por encima de los 2.300 m y ocupa el 45'8% del área situada por debajo de los 1.900 m.

Dentro del grupo de formas nivales se observan afinidades de las distintas unidades por determinados escalones altitudinales. Los nichos nivales antiguos se encuentra localizados casi exclusivamente entre los 1.900 y los 2.100 m, con la máxima presencia en los primeros 100 m de este rango. Por el contrario, algo más del 50% de los nichos nivales activos se encuentran entre los 2.100 y los 2.200 m con una escasa presencia por debajo de los 2.000 m y ausentes por encima de los 2.300 m. Las áreas de alta movilidad nival muestran una distribución muy similar a la de los nichos activos, aunque tienen más extensión que éstos entre los 2.200 y los 2.300 m. Las áreas pronivales no aparecen por encima de los 2.200 m: las activas tienen una presencia del 69'7% entre los 2.100 y los 2.200 m, mientras que la mayor parte de las inactivas (50%) se localizan





Pendiente (en grados)	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS (% superficie)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0 - 6	2,71	1,72	0,00	0,79	0,39	0,35	1,50	0,28	3,27	0,71	0,41	1,14	<b>24,84</b>
6 - 12	8,43	15,42	2,14	3,59	2,05	8,10	4,25	5,60	25,40	12,58	15,08	15,30	17,66
12 - 16	16,25	25,86	12,99	14,79	12,01	22,69	20,01	13,54	<b>29,61</b>	<b>28,54</b>	<b>27,97</b>	<b>45,09</b>	23,47
16 - 19	<b>26,43</b>	<b>26,01</b>	15,39	23,64	18,41	<b>26,27</b>	<b>34,35</b>	17,33	18,18	22,02	27,53	24,90	14,81
19 - 23	22,92	17,20	<b>26,79</b>	<b>26,09</b>	20,42	24,06	23,87	<b>22,82</b>	12,46	20,13	17,72	11,66	9,30
23 - 27	12,26	8,70	23,34	19,44	<b>23,42</b>	12,51	13,21	17,04	5,80	11,55	7,59	14,82	5,30
27 - 33	7,69	4,06	17,91	8,72	18,64	5,12	2,30	17,43	4,26	3,72	3,01	3,30	3,62
33 - 62	3,31	1,02	1,44	2,93	4,67	0,91	0,51	5,97	1,02	0,76	0,68	0,22	1,00

Figura 11. Porcentaje de superficie de cada una de las unidades geomorfológicas en cada uno de los rangos de pendientes naturales.

100 m más abajo y todavía extienden el 22'6% de su superficie en altitudes inferiores (frente al 5'7% en el caso de las activas).

Del resto de formas consideradas no nivales, las áreas de sobre-excavación y los nichos solifiduales muestran una fuerte concentración espacial debido a su escasa presencia en el área de estudio, los primeros entre los 2.000 y los 2.100 m y los segundos entre 1.900 y 2.000 m. Por el contrario, los campos de bloques aparecen en todas las altitudes y, aunque su máxima extensión se localiza entre los 2.000 y los 2.100 m, suponen el 88'7% del territorio situado por encima de los 2.300 m. Los *debris flows*, debido a su desarrollo transversal a la ladera, también presentan un amplio rango de altitudes (1.900-2.300 m), aunque casi el 54% de su superficie se sitúa entre los 2.000 y 2.100 m.

Por último, las incisiones torrenciales y los fondos de valle periglaciario prefieren las altitudes menores de la cuenca, ya que no aparecen por encima de los 2.100 m y su máxima representación se encuentra entre los 1.900 y los 2.000 m.

### 5.b) Pendiente

Para analizar la distribución espacial de las unidades geomorfológicas en relación con la pendiente se ha observado la mayor extensión de cada una de las formas en cada rango de pendiente (Fig. 11). Así, se advierte que aproximadamente el 26'4% de la extensión ocupada por afloramientos rocosos y el manto de alteración presenta inclinaciones entre 16 y 19°, aunque la primera unidad está también ampliamente representada entre los 19 y 23° (22'92%) y la segunda entre los 12 y 16° (25'8%).

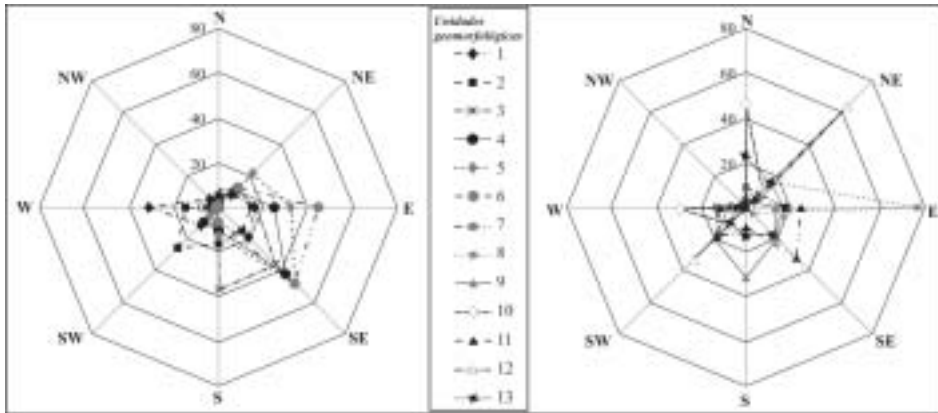
Las formas nivales muestran preferencias por determinadas franjas de pendientes. De esta manera, el 50% del área ocupada por los antiguos nichos nivales se encuentra entre los 17 y 27° y su presencia en inclinaciones mayores no es despreciable (18% entre 27 y 33°). Los nichos nivales activos en el presente se localizan en laderas menos inclinadas (23'6% en pendientes de 16 a 19° y 26% con 19-23°), aunque las áreas de alta movilidad nival tienen su máxima extensión en desniveles mayores –el 23'4% con 23-27° de inclinación, el 20'4% entre 19 y 23° y el 18'6% entre 27 y 33°– e incluso tienen una presencia relativa mayor, después de las áreas de sobre-excavación, en pendientes superiores a los 33°. Ladera abajo, las áreas pronivales se caracterizan por inclinaciones menores, con su máxima extensión sobre desniveles de 16-19°, aunque con una ligera diferencia entre las inactivas y las activas. Mientras que las primeras se distribuyen uniformemente entre los tres escalones de pendientes de 12 a 23° (22, 26 y 24% de su superficie respectivamente), las áreas activas muestran una mayor concentración espacial en pendientes de 16 a 19° (34%) y una menor presencia en desniveles inferiores.

De las unidades geomorfológicas restantes, sólo las áreas de sobre-excavación se localizan preferentemente en pendientes superiores a los 19°, con un 22'8% de su superficie en inclinaciones de 19-23° y un 34% con pendientes entre 23 y 33°. El resto de las formas de relieve presentan su máxima extensión en intervalos de pendientes de 12 a 16°, excepto las incisiones torrenciales con el 24'8% sobre las áreas más planas y escasamente representadas por encima de los 19°.

Los fondos de valle periglaciario tiene una clara preferencia por pendientes de 6 a 16° (50% de su extensión) y los campos de bloques se localizan preferentemente entre los 12 y 19° de pendiente (50%), al igual que el 45% de la superficie de los *debris flows*. Los nichos solifluidales, debido a su escasa representación espacial en la cuenca, presentan un rango de inclinaciones concreto (12-16°).

### 5.c) Orientación

Las formas de relieve de esta área muestran una clara preferencia por determinadas orientaciones en su distribución espacial (Fig. 12). Así, los afloramientos rocosos se dirigen principalmente hacia el W (31'2%), si bien no descartan el resto de orientaciones, e incluso suponen el 40'8% del área orientada hacia el NW. El manto de alteración ocupa



UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	
N	4,35	4,79	0,00	1,04	0,68	0,21	8,95	3,67	4,45	<b>47,19</b>	2,68	0,68	<b>23,65</b>
NE	7,97	8,50	10,59	10,63	1,80	0,32	7,97	16,73	2,90	10,52	2,77	<b>64,07</b>	15,49
E	13,42	14,76	16,73	24,38	31,91	44,47	17,02	<b>76,71</b>	12,86	1,35	25,34	2,04	17,48
SE	19,60	14,81	36,13	<b>42,90</b>	<b>47,90</b>	<b>47,98</b>	<b>19,01</b>	2,88	20,65	0,00	<b>31,62</b>	0,03	16,81
S	6,59	15,79	<b>36,56</b>	10,16	12,07	6,87	12,69	0,00	<b>32,20</b>	0,79	8,45	0,00	12,99
SW	11,16	<b>25,71</b>	0,00	8,48	5,06	0,15	18,50	0,00	18,95	10,26	17,87	33,18	9,96
W	<b>31,22</b>	14,72	0,00	2,36	0,58	0,00	14,77	0,00	7,97	29,08	11,28	0,00	3,54
NW	5,68	0,93	0,00	0,05	0,00	0,00	1,11	0,00	0,01	0,81	0,00	0,00	0,08

Figura 12. Porcentaje de superficie de cada una de las unidades geomorfológicas en cada una de las orientaciones.

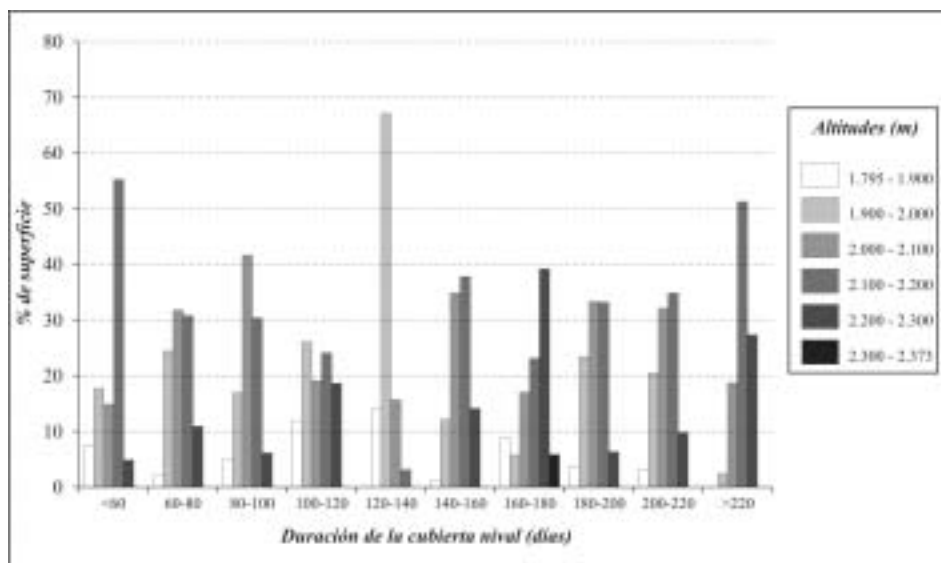
también una importante extensión en las orientaciones NW, aunque su máxima superficie quede situada hacia el SW y el resto se distribuya más homogéneamente por el resto de las disposiciones.

Las formas nivales presentan una clara preferencia en cuanto a su orientación, la mayor parte de su superficie está dispuesta hacia el SE, aunque con algunas peculiaridades. En el caso de los nichos nivales antiguos, esta orientación dominante la comparten con las orientaciones S (36% de la superficie para cada caso) y no aparecen situados entre el SW y el N. A diferencia de esto, la mayor superficie de los nichos nivales activos se dirige hacia el SE (42'9%) y un 24'4% hacia el E; y en las demás orientaciones está representado por pequeñas superficies. Una pauta similar tienen las áreas de alta movilidad nival, aunque estas muestran una disposición más destacada entre el E (31'9%) y el S (12'1%) y su presencia es mínima de SW a NE. Mucho más marcada es la tendencia de las áreas pronivales por las orientaciones SE (48%), con la diferencia de que el resto de la superficie de las inactivas se concentra hacia el E (44'5%), mientras que las activas tienen una mayor presencia en todas las orientaciones, aunque sigue siendo el E el punto de alineación preferido (30'6%).

Del resto de las unidades geomorfológicas, las áreas de sobre-excavación son las que muestran la concentración espacial más acusada en cuanto a orientación, ya que sólo aparecen de N a SE, con un máximo de presencia (76'7%) hacia el E. Mejor distribuidos están los fondos de valle periglaciario, aunque con preferencia por las exposiciones de E a SW, en especial por la orientación S (32'2%).

La máxima superficie con exposición N la constituyen los campos de bloques de las laderas de La Maliciosa, aunque esta unidad también tiene importantes extensiones hacia el SW y W (laderas de Cabeza de Hierro Menor y de las Lomas de Cabezas).

Respecto a las formas de ladera, hay que notar que la mitad de la superficie representada por los *debris flows* se orienta hacia el E y hacia el SE, mientras que el 39% aparece en laderas SW y W; y que el 64% de la superficie de los nichos solifluídales se orienta hacia el NE y el 33% lo hace en sentido opuesto. Las incisiones torrenciales se orientan preferentemente hacia el N (23'6%) y el resto de su superficie se dispone en porcentajes decrecientes de NE a NW.



Altitudes (en metros)	DURACIÓN DE LA NIEVE (en días)									
	<60	60-79	80-99	100-119	120-139	140-159	160-179	180-199	200-219	>219
1.795-1.900	7,49	2,07	5,06	11,88	0,00	1,11	8,80	3,60	2,82	0,00
1.900-2.000	17,86	24,40	17,02	26,13	14,15	12,12	5,84	23,49	20,39	2,41
2.000-2.100	14,79	31,99	41,64	19,26	67,11	34,79	16,99	33,35	32,03	18,82
2.100-2.200	55,21	30,76	30,18	24,20	15,72	37,83	23,10	33,14	34,84	51,35
2.200-2.300	4,66	10,77	6,10	18,53	3,02	14,16	39,40	6,42	9,92	27,41
2.300-2.373	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,88	0,01	0,00	0,00

Figura 13. Porcentaje de superficie de cada una de las categorías de permanencia nival en cada uno de los rangos de altitud establecidos.

## 6. Resultados (II). Relaciones entre la permanencia de la nieve y la orografía

### 6.a) Altitud

Si atendemos a la máxima representación de cada período de permanencia de la nieve en el suelo para cada rango de altitud (Fig.13), se puede observar que las mayores extensiones de casi todos los grupos quedan en las franjas de altitud de 2.000-2.100 m y 2.100-2.200 m, ya que también son las que cubren mayor superficie de la cuenca (35'7% y 29'6% respectivamente). Así sucede con el 62% de la superficie que tiene una cubierta nival entre 60 y 79 días; aproximadamente el 72% de las superficies con persistencias nivales entre 80 y 99 días y 140-159 días; el 66% de las áreas que conservan la nieve entre 180 y 219 días; y el 82'8% que lo hacen entre 120 y 139 días. Las cifras que resultan más significativas en la tabla son aquellas que superan el 50% de la superficie de algún período para una altitud determinada. Así, más de la mitad de la superficie con una permanencia nival de menos de 60 días y de más de 219 días al año se encuentra en la franja altitudinal de 2.100 a 2.200 m; y el 67% de la extensión con permanencias entre 120 y 139 días se localiza entre 2.000 y 2.100 m.

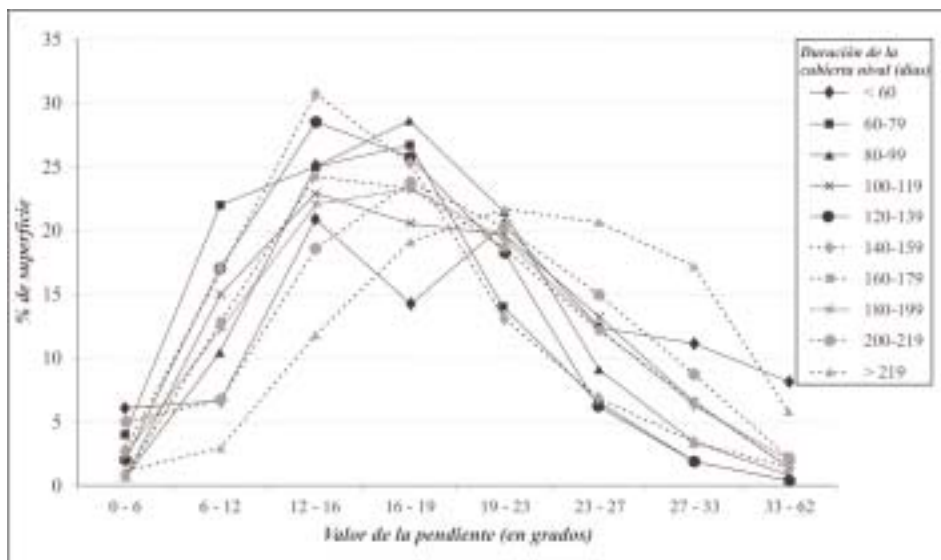
Tan sólo la mayor superficie (el 40%) cubierta entre 160 y 179 días dispone en la franja altitudinal de 2.200-2.300 m y el 26'1% del área con permanencias entre 100 y 119 días se sitúa entre 1.900 y 2.000 m.

Por otra parte, también se advierte que el 99'8% de la superficie que queda por encima de los 2.300 m permanece tapizada por la nieve entre 160 y 179 días y el 60% del área por debajo de los 1.900 m de altura tiene una duración nival que oscila entre los 80 y 119 días al año. Las franjas de altitud situadas entre 1.900 y 2.200 m mantienen la mayor parte de su superficie (24/30%) protegida por la nieve entre 80 y 99 días al año, mientras que casi el 25% de la superficie entre 2.200 y 2.300 m conserva la nieve entre 160 y 179 días al año.

### 6.b) Pendiente

La distribución espacial de las áreas cubiertas por la nieve en distintos períodos de tiempo respecto de la pendiente parece bastante regular. Según los porcentajes de superficie de cada uno de los rangos temporales localizados en las distintas categorías de pendiente (Fig. 14), se observa que las máximas extensiones se encuentran en inclinaciones de 12-16° y 16-19°, a excepción de las duraciones mayores a 219 días al año, que tienen una presencia significativa en pendientes superiores (21'6% en pendientes de 19-23° y 20'6% en 23-27°), mientras que en terrenos con declives inferiores a 19° las superficies son menores que para el resto de las series temporales.

En el caso de la distribución de áreas ocupadas durante los distintos períodos dentro de un mismo rango de pendiente (Fig. 15), se observa que el 20% de las partes más planas permanecen protegidas por la nieve entre 60 y 79 días al año, mientras que los sectores con inclinaciones superiores a 27° la nieve permanece entre 180 y 199 días al año en el 43% de su superficie. En el resto de los rangos de pendiente las mayores extensiones quedan cubiertas durante 80-99 días, aunque por encima de los 16° ya empiezan a aparecer áreas considerables (14, 15'6 y 18'3%) ocultas durante más de 179 días.



Pendiente (en grados)	DURACIÓN DE LA NIEVE (en días)									
	<60	60-79	80-99	100-119	120-139	140-159	160-179	180-199	200-219	>219
0 - 6	6,08	3,92	0,70	0,77	2,03	2,78	0,70	2,46	5,01	1,12
6 - 12	6,65	21,89	10,54	14,99	17,03	16,72	12,85	12,28	6,68	2,85
12 - 16	20,90	24,87	25,25	22,97	28,49	30,75	24,24	22,00	18,50	11,76
16 - 19	14,22	26,65	28,60	20,46	25,68	25,24	23,35	23,33	23,71	19,13
19 - 23	20,50	14,04	21,51	19,69	18,26	13,05	18,67	19,35	20,33	21,64
23 - 27	12,44	6,45	9,18	13,21	6,25	6,81	12,13	12,31	14,92	20,63
27 - 33	11,14	1,85	3,42	6,47	2,02	3,43	6,63	6,30	8,67	17,19
33 - 62	8,08	0,34	0,80	1,44	0,24	1,22	1,43	1,97	2,18	5,67

Figura 14. Porcentaje de superficie de cada una de las categorías de permanencia nival en cada uno de los rangos de pendientes naturales.

La tendencia general es que el porcentaje de las superficies cubiertas más de 179 días y menos de 60 días al año disminuye en la inflexión de 6°, para luego experimentar un incremento paulatino con el aumento de pendiente; las superficies cubiertas entre 60 y 79 días disminuyen con la pendiente; las áreas ocultas por la nieve 100-119 días y 160-179 días amplían su presencia relativa en la ruptura de 6°, después disminuyen y vuelven aumentar en torno a los 19°, para luego disminuir ligeramente en el último escalón; las superficies protegidas entre 80 y 99 días al año aumentan su presencia con la pendiente hasta los 23°, punto en el que comienzan a disminuir; los sectores tapados entre 120 y 139 días notan un incremento relativo en la primera inflexión de pendiente, pero luego disminuye su superficie con el aumento de la inclinación del terreno; y las cubiertas que oscilan entre 140 y 159 días reducen su presencia con la inclinación hasta los 33°, donde aumenta ligeramente.

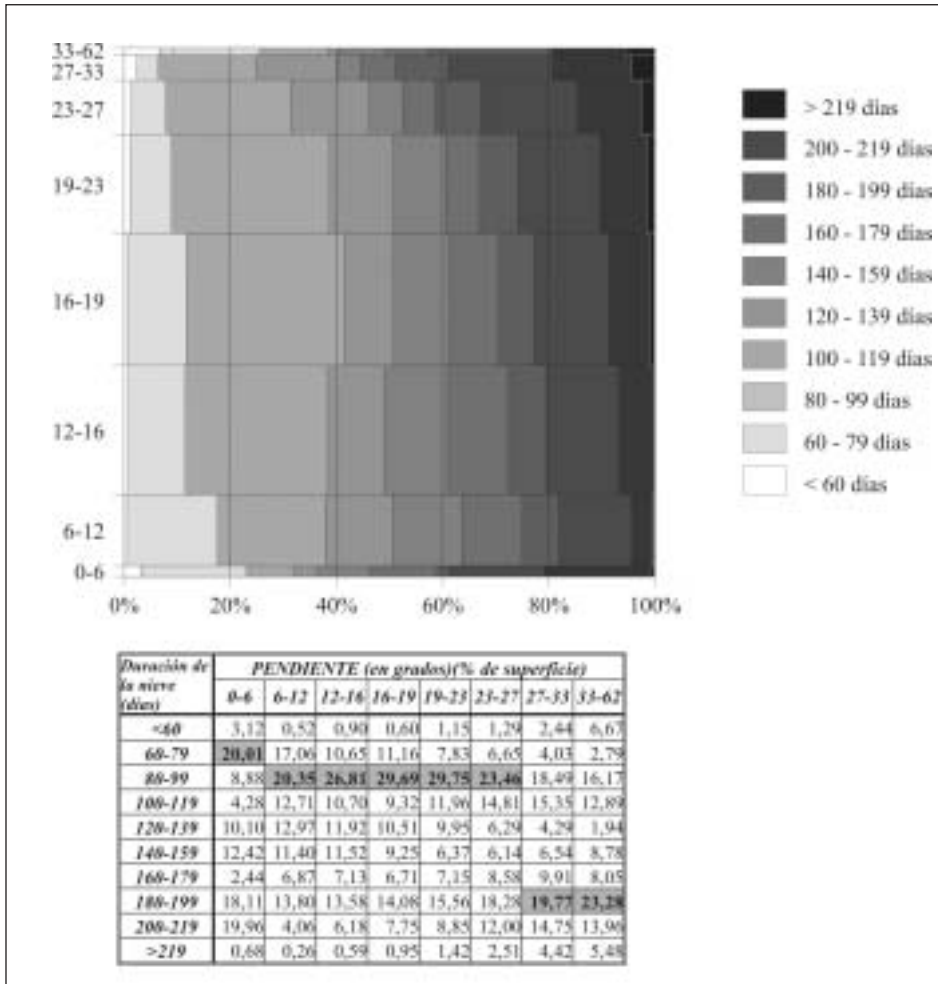
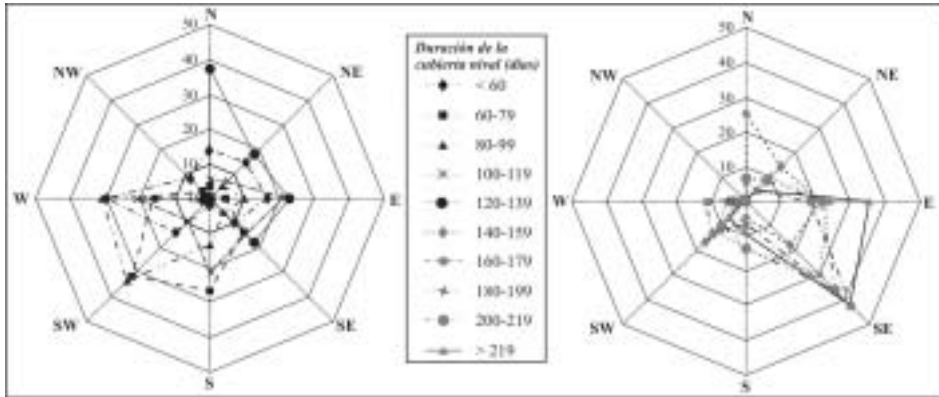


Figura 15. Porcentaje de superficie de cada uno de los rangos de pendiente cubierto por cada intervalo de permanencia de la nieve.

### 6.c) Orientación

El reparto de superficies cubiertas por la nieve durante distintos periodos de tiempo según la orientación de las laderas muestra un patrón de distribución espacial muy definido (Fig.16). El mayor porcentaje de superficie (30'2%) con permanencias inferiores a los 60 días al año se orienta hacia el W y el 45% se reparte de N a E. Al aumentar la persistencia de la nieve en el suelo se nota un ligero cambio de preferencia en la exposición y la mayor parte de la superficie cubierta entre 60 y 99 días se orienta hacia el SW, con máximos secundarios hacia el S y el W. Cuando la nieve supera los 99 días de perma-



★	DURACIÓN DE LA NIEVE (en días)									
	<60	60-79	80-99	100-119	120-139	140-159	160-179	180-199	200-219	>219
N	14,22	3,58	0,55	5,26	37,32	25,29	2,09	5,25	7,10	1,31
NE	14,55	0,70	5,05	6,91	18,05	14,55	4,70	9,38	8,01	4,16
E	16,25	4,46	9,71	22,29	23,46	21,19	18,13	23,16	21,24	35,41
SE	1,33	13,89	5,43	14,48	17,92	17,51	42,68	29,65	36,44	41,94
S	1,74	26,35	13,05	21,08	0,27	4,25	6,13	13,50	13,44	9,78
SW	13,66	31,92	33,56	9,31	0,10	15,96	13,90	12,39	9,79	7,16
W	30,18	15,89	30,70	20,68	2,69	1,07	11,57	6,22	3,77	0,24
NW	8,08	3,21	1,94	0,00	0,19	0,18	0,80	0,45	0,21	0,01

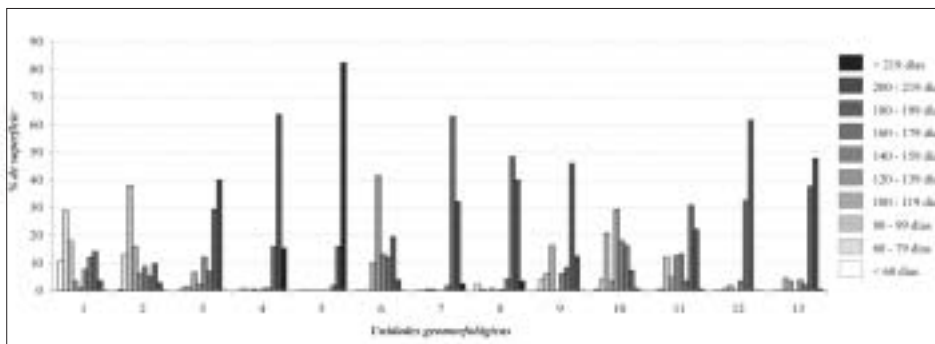
Figura 16. Porcentaje de superficie de cada una de las categorías de permanencia nival en cada una de las orientaciones.

nencia, se empieza a apreciar un cambio en la exposición de los porcentajes de superficie hacia el cuadrante oriental y, así, la mayor superficie cubierta entre 100 y 119 días se orienta hacia el E, aunque todavía tiene cierta importancia el sector occidental (20'7%). Entre 120 y 159 días de duración de la nieve, las mayores superficies aparecen en las laderas septentrionales, con escasa presencia de S a NW, excepto para el caso de un 16% de superficie orientada al SW y protegida entre 140 y 159 días. La nieve que perdura más de 159 días escasea en las orientaciones de NW a NE y en cambio presenta sus máximas concentraciones en las laderas surorientales, con máximos secundarios localizados hacia el E. El caso extremo lo constituyen las laderas cubiertas más de 219 días por el manto nival, ya que el 77'4% de su superficie se encuentra entre el E y el SE.

### 7. Resultados (III). Relaciones entre las unidades del relieve y la permanencia de la nieve

Al relacionar las distintas unidades geomorfológicas con los rangos de permanencia de la cobertura nival, se observan claras afinidades (Fig. 17). En los afloramientos rocosos, la duración de la nieve oscila entre los 60 y 79 días al año, aunque sobre el 27'5%





Duración de la nieve (en días)	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS (% superficie)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<60	10,73	0,27	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	2,32	0,00	0,32	0,00	0,00	0,06
60-79	<b>29,05</b>	13,28	1,44	0,33	0,00	0,00	0,00	0,39	4,23	3,92	0,48	0,00	0,16
80-99	17,84	<b>38,14</b>	1,47	0,00	0,00	0,00	0,39	0,06	6,40	20,83	12,24	0,79	4,37
100-119	3,51	15,99	6,43	0,46	0,00	9,94	0,38	0,76	16,34	3,32	4,74	1,82	3,58
120-139	1,11	6,10	2,52	0,15	0,00	<b>41,40</b>	0,12	0,00	0,08	<b>29,29</b>	12,49	0,00	0,08
140-159	7,65	8,51	11,98	0,65	0,00	13,11	0,17	0,17	6,26	18,13	13,15	3,53	3,66
160-179	12,26	5,08	7,07	0,54	0,00	12,24	1,65	4,24	8,32	16,34	3,61	32,39	2,06
180-199	14,28	9,85	29,35	18,81	1,58	19,40	<b>62,92</b>	<b>48,58</b>	<b>46,01</b>	7,18	<b>30,80</b>	<b>61,47</b>	37,73
200-219	3,55	2,78	<b>39,74</b>	<b>63,70</b>	16,06	3,90	32,02	39,96	12,35	0,68	22,19	0,00	<b>47,93</b>
>219	0,02	0,01	0,00	15,30	<b>82,36</b>	0,00	2,34	3,51	0,00	0,00	0,30	0,00	0,38

Figura 17. Porcentaje de superficie de cada una de las unidades geomorfológicas cubierta por las diferentes grupos temporales de permanencia nival.

la permanencia se alarga entre los 160-199 días. Esta unidad geomorfológica presenta exposiciones preferentes hacia el W (31'2%), precisamente donde se localizan las menores duraciones de la nieve, y entre el E y SE (40%), donde la nieve cubre grandes extensiones más de 159 días al año. Como excepción hay que notar que por encima de los 2.300 m, el 11'3% de la superficie está representada por los afloramientos rocosos de Cabeza de Hierro Menor que, a pesar de estar orientados hacia el SW, tienen permanencias nivales elevadas (160-179 días). Sobre el 67'4% de la extensión del manto de alteración la nieve se mantiene entre 60 y 119 días al año y sólo el 9'8% queda cubierto durante 180-199 días, coincidiendo con exposiciones SE y E.

Las unidades geomorfológicas nivales se caracterizan por una elevada permanencia de la nieve sobre el suelo. Los nichos nivales antiguos, expuestos hacia el E y el SE, permanecen en un 69% cubiertos por el manto nival entre 180 y 219 días al año, no superan en ningún caso los 219 días y el resto de su superficie queda oculta bajo la nieve entre 60 y 179 días al año. En cambio, los nichos activos, con mayor extensión dispuesta hacia el SE y localizados en cotas más elevadas que los anteriores, conservan la nieve más de 180 días al año en el 97'8% de su superficie y en el 63'7% las duraciones oscilan entre 200 y 219 días. Las áreas de alta movilidad nival son los lugares de mayor dura-

bilidad de la nieve (el 98'4% de su superficie queda cubierto más de 199 días al año).

En el caso de las áreas pronivales activas, el 94'9% de su superficie cubierta entre 180 y 219 días al año por la nieve. Las áreas pronivales inactivas permanecen ocultas bajo la nieve entre 120 y 199 días al año, la mayor parte (41'4%) entre 120 y 139 días.

Entre los 2.000 y los 2.200 m se localizan las áreas de sobre-excavación, que presentan pendientes entre 12 y 33° repartidas uniformemente por su superficie. Gracias a su exposición oriental dominante, la duración de la nieve es de 180-219 días al año en la mayor parte de su área (88'4%).

Pese a que los fondos de valle periglaciario se sitúan por debajo de los 2.000 m de latitud, quedan cubiertos por la nieve entre 180 y 219 días al año en el 58% de su superficie.

El 63'8% de la superficie de los campos de bloques queda protegida por la nieve entre 120 y 179 días al año y el 20'8% sólo durante 80-99 días.

Es destacable la alta variabilidad en la duración de la nieve en los canales de los *debris flows*, donde una importante porción de estas formas (30'8%) queda tapada por la nieve entre 180 y 199 días del año.

Los nichos solifluviales se extienden entre los 1.900 y los 2.000 m, con laderas que oscilan fundamentalmente entre los 12 y los 19° de pendiente orientadas hacia el NE (64'1%) y hacia el SW (33'2%). A pesar de estas características poco favorables su superficie queda cubierta entre 160 y 199 días al año por la nieve.

Las incisiones torrenciales, localizadas por debajo de los 2.000 m de altura y en laderas de poca pendiente (0-6°), acumulan nieve durante 180-219 días al año.

## 8. Discusión

Los resultados del presente trabajo muestran una estrecha relación entre la distribución de las formas y la distribución de la permanencia de la nieve, al menos en una amplia parte del área de estudio.

En primer lugar, los resultados inducen a pensar que las formas heredadas del pasado son respetadas gracias a su escasa nivación. Esto se da en las vertientes septentrionales y occidentales, al ser éstas las que coinciden con la procedencia de los vientos que traen las borrascas invernales, ya desde el último periodo glaciario (Obermaier y Carandell, 1917; Franzle, 1959; Sanz, 1988; Muñoz *et al.*, 1995; Palacios y García, 1997a; Martínez de Pisón y Palacios, 1998; Palacios y Andrés, 2000; Palacios *et al.*, 2003a).

El manto de alteración, la forma más abundante, con casi el 60% de toda el área, se conserva en todas las altitudes, salvó por encima de los 2.300 m donde siempre ha sido sustituido por el campo de bloques. Se mantiene estable en pendientes importantes (por ejemplo, más del 30% de su superficie está por encima de los 19° de pendiente), pero

prefiere las orientaciones occidentales y meridionales (casi el 60% de su superficie), las menos nivadas. Su conservación se explica, por tanto, por la escasa actividad geomorfológica que permite la ausencia de nieve sobre su superficie. De hecho, en la actualidad, el 67% de su superficie está cubierta de nieve menos de 120 días al año.

Los campos de bloques periglaciares ocupan posiciones topográficas elevadas (el 88,7% del territorio situado por encima de los 2.300 m), sin embargo casi el 73% de su superficie está cubierta de nieve menos de 140 días al año. Estos campos se desarrollan en la Sierra sólo en orientaciones septentrionales y occidentales (Bullón, 1988 y Sanz, 1988), al igual que ocurre en el área de estudio, y no son las más favorables para la acumulación nival. Por lo tanto, también su conservación se puede deber a su escasa nivación.

Los resultados sobre los afloramientos rocosos no son tan claros, ya que se dan áreas con muy poca acumulación nival y otras con mucha. Este hecho se debe a que se han incluido dentro de esta unidad a formaciones geomorfológicas muy dispares cronológicamente, como son los *tors* de los interfluvios y los afloramientos rocosos en paredes posiblemente glaciares o nivales y, por lo tanto, mucho más recientes.

Las formas caracterizadas como nivales coinciden con las áreas de mayor permanencia de la nieve en la actualidad y, por lo tanto, tienen la misma orientación predominante, E y, sobre todo, SE, a sotavento de los vientos predominantes del W-SW (Palacios y Andrés, 2000; y Palacios et al., 2003a y 2004). Los nichos que han quedado inactivos se encuentran a menor altitud (entre 1.900 y 2.100 m) que los activos (entre 2.100 y 2.200 m); además, en los inactivos la orientación S es importante (36%), mientras que está casi no existe en los activos, donde es predominante la SE (43%) y E (24%). Las áreas de máxima nivación se dan en altitudes similares a la de los nichos activos, en áreas con fuertes pendientes (el 67% por encima de los 19° de pendiente) y en orientaciones preferentemente al E (32%). La diferencia principal entre las tres categorías geomorfológicas nivales es la duración de la nieve en la actualidad: en las inactivas la nieve dura en un 39,7% más de 199 días al año, mientras que en los activos la nieve dura un 79% por encima de ese periodo y en las áreas de alta movilidad lo hace en un 98% (el 82% de la superficie permanece cubierta 220 días o más).

Por lo mostrado anteriormente, el umbral de los 220 días al año de permanencia de la nieve en el suelo aparece como determinante en la actividad geomorfológica nival. Por encima de este periodo, al menos en la Sierra de Guadarrama, la acción erosiva se desencadena, seguramente ante la imposibilidad de la vegetación de sobrevivir a esa prolongada cubierta helada (Palacios y García, 1969b; Palacios et al., 2003a; y Palacios et al., 2004). De hecho, en la actualidad, sólo en los sectores donde el periodo nival supera esa cifra se mantiene la actividad importante propia de la acción erosiva nival. Este es el caso de las áreas donde la altitud (alrededor de los 2.200 m), la orientación (E o SE) y una pendiente acusada permite que el abundante agua aportada por la nieve acelere los procesos erosivos. Esta acción erosiva nival es eficaz y capaz de dismantelar las alteritas gnesicas, lavando los finos y removiendo bloques de forma aislada (Ahlmann, 1919;

Strömquist, 1985; Nyberg, 1991; y Ballantyne y Harris, 1994).

El conocido descenso del número de días de permanencia de la nieve en el suelo, a lo largo de las últimas décadas (Palacios *et al.*, 2003a), ha provocado la desaparición de la actividad nival en algunos nichos, justamente allí donde el periodo nival ha descendido por debajo de los 219 días al año. Este fue el caso de nichos situados a menor altitud o con una orientación meridional menos favorable. Las áreas pronivales activas se han visto también reducidas. En este caso se han mantenido en una estrecha franja justo por debajo de los nichos nivales, entre los 2.000 y los 2.200 m de altitud (94% de su superficie).

Los resultados también muestran la alta capacidad de los canales para retener la nieve, aunque aparentemente se desarrollen en orientaciones poco propicias o a bajas altitudes. Por ejemplo, a pesar de que los *debris flows* se encuentran en casi un 40% de su superficie en orientaciones W o SW, más del 50% de ésta retiene la nieve más de 180 días al año. En el caso de las incisiones torrenciales, a pesar de que más del 75% de su superficie está por debajo de los 2.000 m, el 85% de esta superficie retiene la nieve más de 180 días al año. Este hecho confirma que un proceso torrencial o de movimientos en masa puede alterar el régimen de distribución de la nieve e iniciarse la formación de nuevos nichos de nivación (Ahlmann, 1919; Lewis, 1939; McCabe, 1939; Groom, 1959; Rapp, 1960; Palacios *et al.*, 2003a y 2004).

La íntima relación entre una prolongada permanencia de la nieve en el suelo y la actividad erosiva parece demostrar que la nieve, cuando se acumula el tiempo suficiente, es capaz de hacer retroceder las paredes de los canales y hoyos nivales. Podría ser, por tanto, la causante de la disimetría de muchos canales y de la coalescencia de los hoyos (Lewis, 1939; McCabe, 1939; Groom, 1959; Watson, 1966; Palacios *et al.*, 2003a y 2004).

## 9. Conclusiones

Los resultados de este trabajo vienen a confirmar el mantenimiento del mismo régimen de vientos del W, responsables de las principales tormentas de nieve, desde la última crisis fría pleistocena, que causó la formación de los últimos glaciares en la Sierra, hasta la actualidad, provocando la acumulación nival en las vertientes opuestas. La dinámica geomorfológica holocena respeta las formas del relieve previas, también las elaboradas en materiales deleznable, como el manto de alteración, mientras no se superen aproximadamente los 220 días al año como media de nieve en el suelo. Superado este periodo nival, el agua de deshielo tiene la suficiente capacidad erosiva como para desmantelar los materiales alterados. Este límite es tan sensible, que una ligera disminución de la permanencia de la nieve en el suelo, como la sufrida en las últimas décadas, es capaz de desactivar las áreas nivales menos favorables o acortar las áreas pronivales. Esta dinámica se rompe con la apertura de nuevos canales, ya sean debidos a la incisión torrencial o ya sean causados por la formación de *debris flows*. Estos canales suponen nuevas áreas de acumulación nival y en ellas, cuando se supera el límite aproximado de

220 días al año, se activa la nivación, a pesar de no estar situadas en vertientes o altitudes favorables. Mientras la permanencia de la nieve se mantenga por encima del citado periodo, la erosión será capaz de hacer retroceder las paredes afectadas y transformar la morfología de los canales y de los nichos nivales.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por dos proyectos de la Comunidad de Madrid (CAM 07M/0075/2000 y CAM 07M/0055/2002). Los autores dedican un especial agradecimiento a la Empresa Retevisión, propietaria de parte del área y de la vía principal de acceso, por su constante apoyo y ayuda.

### Referencias bibliográficas

- AHLMANN, H. W. (1919). Geomorphological studies in Norway. *Geografiska Annaler*, 1: 1-148 y 193-252.
- BALLANTYNE, C. K. y HARRIS, C. (1994). *The Periglaciation of Great Britain*, Cambridge University Press.
- BULLÓN, T. (1988). *El Guadarrama Occidental*. Comunidad de Madrid, Madrid.
- CHRISTIANSEN, H.H. (1996). *Nivation forms, processes and sediments in recent and former periglacial areas*. Geographica Hafniensia A4, Copenhagen.
- CHRISTIANSEN, H. H. (1998). Nivation forms and processes in unconsolidated sediments in Greenland, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 23: 751-760.
- DALY, C. (1984). Snow distribution patterns in the alpine krummholz zone. *Progress in Physical Geography*, 8(2): 157-173.
- DARMODY, R.G.; THORN, C.E.; HARDER, R.L.; SCHYLTER, J.P.L. y DIXON, J.C. (2000). Weathering implications of water chemistry in an arctic-alpine environment, northern Sweden, *Geomorphology*, 34: 89-100.
- DAVIS, W.M. (1906). The sculpture of mountains by glaciers, *Scottish Geographical Magazine*, 22: 1-30.
- FRNÄZLE, O. (1959). *Glaziale und periglaziale formbildung im östlichen kastilischen scheidengebirge Zentral-Spanien*. Bonner Geographische Abhandlungen, Bonn.
- GROOM, G. E. (1959). Niche glaciers in Bunsow Land, Vest-Spitsbergen, *Journal of Geology*, 44: 369-376.
- HOBBS, W.H. (1910). The cycle of mountain glaciation, *The Geographical Journal*, 35: 146-163 y 268-284.
- LEWIS, W. V. (1939). Nivation, river grading and shoreline development in south-east

- Iceland, *Geographical Journal* 88: 431-437.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E. y PALACIOS, D. (1998). Significado del episodio glaciar en la evolución morfológica y en el paisaje de la Sierra de Gredos. Sistema Central, In: Gómez Ortiz, A., Pérez Alberti, A. (Eds.), *Las Huellas Glaciares de las Montañas Españolas*. Geoforma, Barcelona, pp. 163-207.
- MATTHES, F.E. (1900). Glacial sculpture of the Bighorn Mountains, Wyoming, U.S., *Geological Survey 21st Annual Report 1899-1900*, pp. 167-190.
- MCCABE, L. H. (1939). Nivation and corrie erosion in West Spitsbergen, *Geographical Journal* 94: 447-465.
- MUÑOZ, J.; PALACIOS, D. y MARCOS, J. (1995). The influence of the geomorphologic heritage on present slope dynamics. The Gredos Cirque, Spain, *Pirineos*, 146: 35-63.
- NYBERG, R. (1991). Geomorphic processes at snowpatch sites in the Abisko mountains, northern Sweden, *Z. Geomorph. N.F.* 35(3): 321-343.
- OBERMAIER, H. y CARANDELL, J. (1917). Los glaciares cuaternarios de la Sierra de Guadarrama, *Tra. Mus. Nac. de Ciencias Naturales*, 19: 1-92.
- PALACIOS, D. y GARCÍA, M. (1997a). The Influence of Nival Erosion on the Distribution of High Mountain Vegetation: Peñalara, Spain, *Catena*, 30: 1-40.
- PALACIOS, D. y GARCÍA, M. (1997b). The influence of geomorphologic heritage on present nival erosion: Peñalara, Spain, *Geografiska Annaler*, 79 A(1-2): 25-40.
- PALACIOS, D. y ANDRÉS, N. (2000). Morfodinámica supraforestal actual en la Sierra de Guadarrama y su relación con la cubierta nival: el caso de Dos Hermanas-Peñalara, In: J.L. Peña, M. Sánchez-Fabre, Lozano, M.V. (Eds.) *Procesos y formas periglaciares en la montaña mediterránea*. Instituto de Estudios Turolenses, Teruel, pp. 235-264.
- PALACIOS, D.; ANDRÉS, N. y LUENGO, E. (2003a). Distribution and effectiveness of nivation in Mediterranean mountains: Peñalara (Spain), *Geomorphology*, 54 (3-4): 157-178.
- PALACIOS, D.; GARCÍA, R.; RUBIO, V. y VIGIL, R. (2003b). Slope debris flows as a step in the evolution of the drainage system in a weathered granitic massif: Sierra de Gredos, Spain, *Catena*, 5: 115-140.
- PALACIOS, D.; ANDRÉS, N. y LUENGO, E. (2004). Tipología y evolución de los nichos de nivación en la Sierra de Guadarrama, España, *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 99 (1-4): 141-158.
- RAPP, A. (1960). Recent developemnt of mountain slopes in Kärkevagge and sorroundings, north Scandinavia, *Geografiska Annaler*, 42: 65-200.

- RAPP, A. y NYBERG, R. (1988). Mass movements, nivation processes and climatic fluctuations in northern Scandinavian mountains, *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 42: 245-253.
- SANZ, C. (1988). *El relieve del Guadarrama Oriental*, Consejería de Política Territorial, Comunidad de Madrid, Madrid.
- SOUTADÉ, G. (1980). *Modelé et dynamique actuelle des versants supra-forestiers des Pyrénées Orientales*, Cooperative du Sud-Ouest, Albi.
- ST-ONGE, D.A. (1969). Nivation landforms, *Geological Survey of Canadian Paper*, 69, pp. 1-12.
- STRÖMQUIST, L. (1985). Geomorphic impact of snowmelt on slope erosion and sediment production, *Z. Geomorph. N. F.*, 29: 129-138.
- THORN, C. E. 1976. Quantitative evaluation of nivation in the Colorado Front Range, *Geological Society of America Bulletin*, 87: 1169-1178.
- THORN, C.E. y HALL, K. (2002). Nivation and cryoplanation: the case for scrutiny and integration, *Progress in Physical Geography*, 26(4): 633-550.
- WATANABE, T. (1988). Studies of snow accumulation and ablation on perennial snow patches in mountains of Japan, *Progress in Physical Geography*, 12(4): 533-559.
- WATSON, E. (1966). Two nivation cirques near Aberystwyth. *Biuoletyn Peryglacjalny*, 8: 1-6.