

**USO DE S.I.G. Y PROCEDIMIENTOS MULTIVARIABLES
PARA EL ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN
DE PROCESOS GEOMÓRFICOS EN MONTAÑA.**

Constanza GONZÁLEZ (1)

Luis ORTIGOSA (2)

Carlos MARTÍ (1)

José M. GARCÍA RUIZ (1)

(1) *Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Zaragoza.*

(2) *Departamento de Geografía, Univ. de La Rioja, Logroño.*

RESUMEN: Mediante técnicas S.I.G. y análisis estadísticos multivariados se estudian los factores que explican la distribución de geoformas, actualmente dinámicas, en alta montaña. La litología y la altitud son las variables más determinantes. El método empleado permite distinguir tres grupos de geoformas, uno de los cuales está relacionado con la deforestación que rebajó a partir del siglo XI el límite superior del bosque.

ABSTRACT: By means of G.I.S. techniques and multivariable statistical analyses the factors explaining the distribution of high mountain geoforms are studied. Lithology and altitude are the most determinat variables. The method used allows us to distinguish three groups of geoforms, one of them related to the forest devastation that lowered the upper forest limit since the 11th century.

INTRODUCCIÓN.

La montaña se caracteriza por su complejidad topográfica y climática. La diversidad litológica y la herencia de uno o varios ciclos tectónicos, así como la larga historia geomorfológica generan una gran variedad de formas de relieve, con bruscos cambios de pendiente, suelos de potencia muy variada y distintas posibilidades de meteorización del roquedo. De igual forma, el fuerte contraste altitudinal entre los fondos de valle y las cumbres provocan enormes diferencias térmicas y pluviométricas que condicionan el predominio de unos u otros procesos geomorfológicos.

Como es bien sabido, la distribución espacial de los procesos geomórficos no

es aleatoria, sino que se halla determinada por la compleja interacción de diversos factores abióticos y bióticos. Definir y comprender esa organización espacial es fundamental para interpretar la dinámica global de los territorios montañosos. En un trabajo anterior, sobre una litología homogénea como el flysch, pudo detectarse en qué condiciones topográficas domina cada proceso geomórfico (GARCÍA RUIZ & PUIGDEFÁBREGAS, 1982). Más tarde se insistió en el control de la topografía sobre los movimientos en masa poco profundos (DEL BARRIO & PUIGDEFÁBREGAS, 1987).

Los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) permiten disponer de un instrumento potente para superponer capas a la información geomorfológica y litológica. En este trabajo tales capas proceden de un modelo digital del terreno a escala 1:50.000 del que derivan los rasgos de altitud, pendiente y exposición. El tratamiento estadístico de esta información contribuye a jerarquizar los factores que explican la distribución de procesos geomorfológicos en montaña y a definir sus preferencias locacionales. Para ello se ha elegido la hoja del M.T.N. nº 145 (Sallent), cuya base geomorfológica está ya elaborada (GARCÍA RUIZ, 1989).

EL ÁREA DE ESTUDIO.

La hoja de Sallent comprende fundamentalmente la cuenca alta del río Gállego, además del sector oriental de la cabecera del río Aragón. En términos generales puede considerarse como una zona de alta montaña, pues casi el 50 por ciento del territorio se encuentra por encima de 2.000 m s.n.m.. Gran parte del relieve es muy escarpado, alternando en el sector central con altitudes más moderadas y topografía suave. Pizarras (41 %) y calizas (29 %) dominan ampliamente sobre el resto de las litologías (Fig. 1).

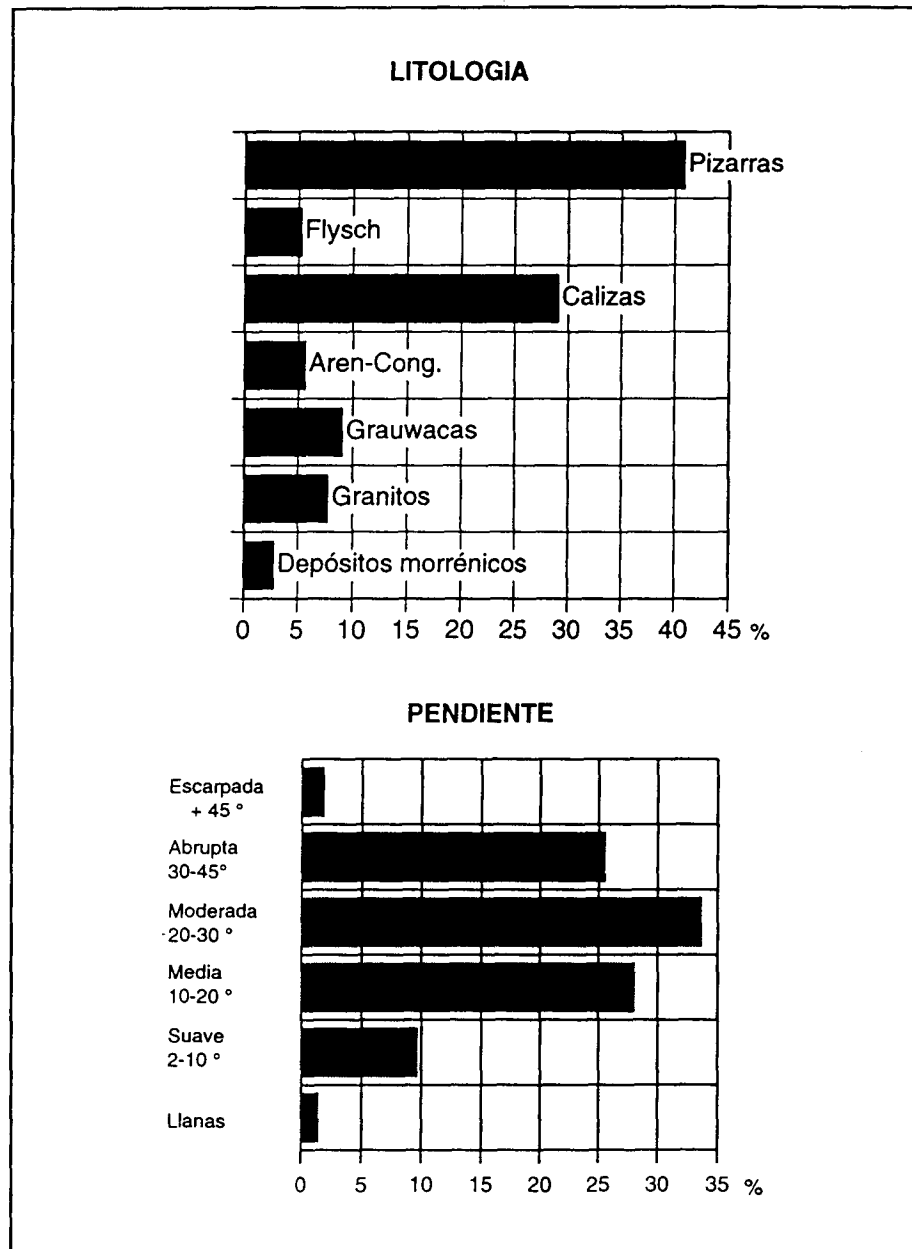


Fig. 1. Distribución de litologías y pendientes en el área de estudio.

Las precipitaciones son abundantes, con ausencia de sequía y máximo invernal. Los inviernos son fríos y los veranos frescos. Valores medios de -4°C se han estimado en las zonas más elevadas. La isoterma de 0°C entre noviembre y marzo se localiza a 1.635 m en la cuanca del Gállego (GARCÍA RUIZ *et al.*, 1985).

Los fondos de valle y los rellanos colgados más importantes están ocupados por prados. Al margen de estos últimos, por debajo de 1.700 m de altitud predominan extensos bosques mixtos de haya y pino silvestre. Por encima de ese umbral se desarrollan extensos pastos de aprovechamiento estival. A más de 2.400 m el paisaje está dominado por el roquedo.

MÉTODOS.

El esquema metodológico ha seguido los siguientes pasos:

a) Elaboración de un MDT con el software ERDAS, versión 7.5, realizado a partir del fichero vectorial de las curvas de nivel de la hoja de Sallent a escala 1:50.000. La imagen hipsométrica se ha obtenido mediante algoritmos de interpolación de múltiples puntos ponderados por la distancia, con una resolución final de 50×50 m de tamaño de celda raster. Con este MDT se han elaborado automáticamente los mapas de pendientes y exposiciones.

b) Digitalización del mapa geomorfológico de Sallent mediante imágenes escaneadas y georeferenciadas. Se seleccionaron las geoformas indicadoras de actividad geomorfológica actual o muy reciente: movimientos en masa, formas derivadas de la escorrentía superficial y fenómenos vinculados en mayor o menor medida a contrastes térmicos y presencia persistente de hielo en el suelo. En las tablas 1 y 2 pueden consultarse las geoformas seleccionadas. De igual forma se ha procedido con el mapa litológico, derivado de una simplificación del mapa geológico del ITGE (1990).

c) Tratamiento estadístico multivariable, para el cual se ha empleado un programa específico, ajeno al SIG, como es el SPSS, principalmente porque el SIG tiene unos recursos muy limitados para la realización e interpretación de procedimientos multivariados. Por ello se han exportado a ficheros matriciales (formato ASCII) las imágenes del SIG: Altitud, Pendiente, Exposición, Litología y Geomorfolología, de modo que se pudieran tratar como variables en el módulo estadístico. Conviene precisar que se ha empleado la información sobre todo

como variables categóricas.

Los primeros análisis realizados han sido las tablas de contingencia, relacionando las frecuencias observadas y esperadas (Ji cuadrado) entre las clases geomorfológicas y el resto de los factores. Este tipo de análisis ha mostrado relaciones significativas entre geomorfología y factores ambientales. Se han utilizado también procedimientos multivariantes más globales que permiten interpretar conjuntamente todos los factores. Se realizó en primer lugar un análisis factorial de Componentes Principales orientado a variables categóricas (PRINCALS del SPSS). También se ha realizado un Análisis Discriminante, con objeto de establecer la importancia de los factores que condicionan la presencia de cada geoforma. El siguiente paso fue un análisis jerárquico de cluster aplicado a las distintas geoformas, empleando como variables las coordenadas de todas las dimensiones resultantes del Análisis de Componentes Principales referentes a las categorías geomorfológicas.

RESULTADOS.

Por razones de espacio se evita la inclusión en este trabajo de todas las tablas cruzadas entre geoformas y factores. Por su mayor interés se presentan sólo las tablas de frecuencias entre las categorías de geoformas y de litología (Tabla 1), y entre las categorías de geoformas y de altitud (Tabla 2). La pendiente se muestra también como un factor muy influyente, mientras la exposición carece de la importancia de los restantes factores, al menos a la escala a la que se ha trabajado.

La Tabla 1 confirma que existe una elevada relación entre la litología y los tipos de geoformas dominantes. Eso es especialmente claro en el caso del granito, en el que algunas geoformas quedan excluidas (lenguas de despegue, terracillas, lóbulos de solifluxión y áreas de badlands) mientras que otras se encuentran muy vinculadas a él, sobre todo aquellas que consisten en acumulaciones más o menos organizadas de clastos (derrubios de gravedad, glaciares rocosos, protalus ramparts). Esta es una relación evidente, pues es bien conocida la tendencia del granito a producir abundantes sedimentos gruesos en ambientes fríos y en cambio sus dificultades intrínsecas para provocar movimientos en masa profundos.

En el extremo opuesto se encuentran las pizarras, muy tectonizadas e intensamente meteorizadas en profundidad, lo que explica la presencia muy frecuente de grandes cicatrices de arranque y lenguas de despegue, dando

Tabla 1. Tabla de frecuencias entre las categorías de geoformas y de litología.

| | Morre nas | Grani tos | Grau vaca | Arenis cas | Caliz as | Flysch | Pizarr as |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| Lenguas de despegue | 449 196 20.8 | 0 565 -28.0 | 461 660 -9.2 | 215 411 -11.3 | 1145 2137 -28.8 | 47 385 -20.1 | 5044 3006 54.7 |
| Cicatrices de arranque | 116 89 3.0 | 0 257 -17.6 | 240 300 -3.8 | 90 187 -7.7 | 442 972 -21.3 | 76 175 -8.1 | 2385 1368 37.7 |
| Incisiones | 12 25 -2.7 | 17 72 -6.8 | 298 84 24.8 | 90 52 5.4 | 146 272 -9.2 | 242 49 28.7 | 133 383 -16.9 |
| Coladas de piedras | 0 2.5 -1.6 | 0 7.3 -2.8 | 10 8.5 0.5 | 9 5.3 1.7 | 42 28 3.3 | 8 5 1.4 | 26 39 -2.7 |
| Terracillas | 0 33 -5.9 | 0 95 -10.4 | 511 111 40.5 | 128 69 7.4 | 180 360 -11.5 | 81 65 2.1 | 341 507 -9.8 |
| Lóbulos de solifluxión | 165 97 7.4 | 0 281 -18.5 | 653 328 19.9 | 67 204 -10.5 | 690 1063 -14.4 | 472 192 22.0 | 1614 1495 4.2 |
| Deslizamien tos planares | 15 37 -3.7 | 20 106 -8.9 | 233 124 10.5 | 54 77 -2.8 | 415 402 0.8 | 286 72.5 26.3 | 361 565 -11.4 |
| Cabeceras activas | 0 16.6 -4.2 | 60 48 1.8 | 51 56 -0.7 | 49 35 2.5 | 189 181 0.7 | 205 32.6 31.3 | 69 254 -15.3 |
| Areas de badlands | 43 80 -4.4 | 0 231 -16.6 | 197 269 -4.8 | 0 168 -14 | 24 872 -35.7 | 0 157 -13.5 | 2738 1226 58.8 |
| Derrubios | 68 240 -13 | 1722 692 47.7 | 282 808 -22.7 | 801 503 16.0 | 5186 2616 69.7 | 278 472 -10.7 | 675 3681 -75.3 |
| Glaciares rocosos | 0 19.2 -4.5 | 199 55 20.3 | 0 65 -8.5 | 109 40 11.3 | 212 210 0.2 | 0 38 -6.4 | 202 295 -7.1 |
| Acumulación de bloques | 9 14 -1.3 | 157 40 19.3 | 30 47 -2.6 | 33 29 0.7 | 234 152 8.0 | 47 27 3.9 | 13 214 -18.0 |
| Protalus ramparts | 9 10 -0.3 | 125 29 18.7 | 8 34 -4.7 | 62 21 9.2 | 124 110 1.7 | 12 20 -1.8 | 37 154 -12.3 |
| Canales de avalanchas | 6 33 -4.8 | 274 95 19.5 | 31 111 -8.1 | 165 69 12.1 | 704 359 22 | 2 65 -8.2 | 54 505 -26.6 |

Significación Ji cuadrado: 0.000

Coeficiente de contingencia: 0.652

Tabla 2. Tabla de frecuencias de las categorías de geoformas y altitudes.

| | -1400 m | 1400- 1800 | 1800- 2200 | 2200- 2600 | +2600 |
|-------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Lenguas de despegue | 1270 392 51.6 | 4533 2660 51.4 | 1527 2757 -33.5 | 22 1338 -45 | 9 213 -16 |
| Cicatrices de arranque | 224 178 3.7 | 1957 1210 28.3 | 1144 1254 -4.2 | 24 609 -27.6 | 0 97 -10.5 |
| Incisiones | 31 50 -2.8 | 229 339 -7.6 | 599 351 16.9 | 76 171 -8.1 | 3 27 -4.8 |
| Coladas de piedras | 5 5 0 | 31 34 -0.7 | 47 36 2.4 | 10 17 -1.9 | 2 3 -0.5 |
| Terracillas | 1 66 -8.4 | 112 449 -20.3 | 1019 465 33.1 | 106 226 -9.0 | 3 36 -5.7 |
| Lobulos de solifluxión | 201 195 0.5 | 1912 1323 21.5 | 1498 1371 4.6 | 50 666 -27.9 | 0 106 -11.1 |
| Deslizamientos planares | 0 74 -9.0 | 246 500 -14.5 | 863 518 19.5 | 270 252 1.3 | 5 40 -5.7 |
| Cabeceras activas | 16 33 -3.1 | 33 225 -16.2 | 446 233 17.8 | 128 113 1.5 | 0 18 -4.4 |
| Areas de badlands | 0 159 -13.6 | 1855 1085 30.7 | 1132 1124 0.3 | 15 546 -26.3 | 0 87 -9.9 |
| Derrubios | 20 480 -25.2 | 731 3257 -64.8 | 3340 3375 -0.9 | 4172 1639 80.9 | 749 261 35.8 |
| Glaciares rocosos | 0 38 -6.4 | 186 261 -5.9 | 149 271 -9.4 | 320 131 18.4 | 67 21 10.3 |
| Acumulación de bloques | 0 28 -6.4 | 0 189 -17.3 | 153 196 -3.9 | 310 95 24.6 | 60 15 11.8 |
| Protalus ramparts | 0 20 -4.6 | 0 136 -14.7 | 35 141 -11.4 | 300 69 31.1 | 42 11 9.6 |
| Canales de avalanchas | 16 66 -6.4 | 291 447 -9.4 | 606 463 8.6 | 292 225 5.1 | 31 36 -0.8 |

Significación Ji cuadrado: 0.000

Coeficiente de contingencia: 0.619

sensación de gran plasticidad en un ambiente en el que la humedad estacional juega a favor de los movimientos en masa. Igualmente se asocian a las pizarras los lóbulos de soliflucción y, sobre todo, las áreas de badlands, presentes en el resto de las litologías sólo de manera anecdótica. En cambio todas las geoformas más típicas del granito quedan casi automáticamente excluidas por la ausencia de escarpes resistentes, que pudieran alimentar de clastos a las partes medias y bajas de las laderas.

Las calizas muestran un comportamiento relativamente parecido al del granito, aunque con algunos matices. Es cierto que rechazan la presencia de movimientos en masa profundos y superficiales -por razones similares al granito- y que a ellas se asocian las acumulaciones caóticas de bloques, los canales de avalanchas y, más aún, los derrubios, debido a la presencia de escarpes en las sierras de Telera y Tendeñera, cuya base septentrional se halla cubierta por un espectacular manto de derrubios todavía muy activo. Sin embargo, la presencia de glaciares rocosos y de protalus ramparts es mínima debido probablemente a la limitada altitud que alcanzan las cumbres calizas en comparación con el granito. De forma muy parecida actúan las areniscas.

Por su parte las grauwasas favorecen el desarrollo de movimientos en masa superficiales (terracillas, lóbulos de soliflucción, deslizamientos planares), pero no los profundos y rechazan la presencia de geoformas con clastos y bloques. El flysch -con una extensión muy reducida en la hoja de Sallent- tiene casi las mismas tendencias geomorfológicas, pero son más frecuentes las cabeceras activas. Finalmente, las morrenas evolucionan mediante caídas masivas que cicatrizan muy difícilmente.

La altitud juega igualmente un papel fundamental, aunque en parte se halla condicionada por la propia litología. De hecho, el granito ocupa, aunque no exclusivamente, las áreas más elevadas de la hoja, mientras las pizarras y las morrenas se extienden por altitudes medias y bajas. Por debajo de 1.400 m s.n.m. dominan los movimientos en masa profundos, igual que entre 1.400 y 1.800 m, sólo que en este caso se añaden los lóbulos de soliflucción y las áreas de badlands. A partir de 1.800 m disminuyen rápidamente las lenguas de despegue y comienzan a dominar los movimientos en masa superficiales, sobre todo deslizamientos planares y terracillas, que a su vez reducen su presencia a partir de 2.200 m. Por encima de este umbral el predominio de los derrubios de gravedad es abrumador, especialmente entre 2.200 y 2.600 m, acompañados de acumulaciones caóticas de bloques, glaciares rocosos, protalus ramparts y canales de avalanchas.

El Análisis de Componentes Principales y el Análisis Discriminante permiten

apreciar con mayor claridad las asociaciones que existen entre geoformas y entre estas últimas y los factores ambientales. En el primero de ellos (Fig. 2) se observa que las cicatrices de arranque y las lenguas de despegue -ambas íntimamente asociadas entre sí- se vinculan a las pizarras y a las altitudes medias (hasta 1.800 m); los lóbulos de soliflucción y las áreas de badlands aparecen en pendientes moderadas ($10-20^\circ$); los derrubios de gravedad, los protalus ramparts y los canales de avalancha están ligados preferentemente a los granitos, a las mayores altitudes y a las pendientes más fuertes; por último, los deslizamientos planares, las terracillas, las incisiones y las coladas de piedras aparecen relacionados con grauwacas y flysch, con pendientes de 20 a 30° y con altitudes entre 1.800 y 2.200 m.

El Análisis Discriminante corrobora algunas de estas relaciones y establece claras vinculaciones entre geoformas, definiéndose tres grupos que posteriormente se confirmaron mediante el dendrograma de un cluster (Fig. 3). Es interesante tener en cuenta que el Análisis Discriminante no es capaz de clasificar bien a las geoformas (solamente un 45.6 %), debido a que existe notable confusión entre algunas de ellas por estar relacionadas con las mismas o parecidas variables ambientales. El dendrograma es muy esclarecedor a este respecto definiendo tres grupos bien diferenciados de geoformas. En el primero se localizan las lenguas de despegue, las cicatrices de arranque, los badlands y los lóbulos de soliflucción; en el segundo aparecen las incisiones, los deslizamientos planares, las cabeceras activas, las coladas de piedras y las terracillas; y en el tercero se incluyen derrubios de gravedad, acumulaciones caóticas de bloques, protalus ramparts, glaciares rocosos y canales de avalanchas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

Las formas de relieve vinculadas a procesos actuales se organizan en el espacio de acuerdo con la compleja interacción de factores ambientales, especialmente la topografía (altitud, pendiente, exposición) y la litología. La influencia climática, que se considera determinante para muchos de los procesos, actúa en este caso a través de variables topográficas (altitud y exposición). Utilizando como base informativa el mapa geomorfológico de Sallent se ha confirmado el importante papel que juega la litología, pues determinados tipos de rocas favorecen la presencia de ciertas geoformas y no otras.

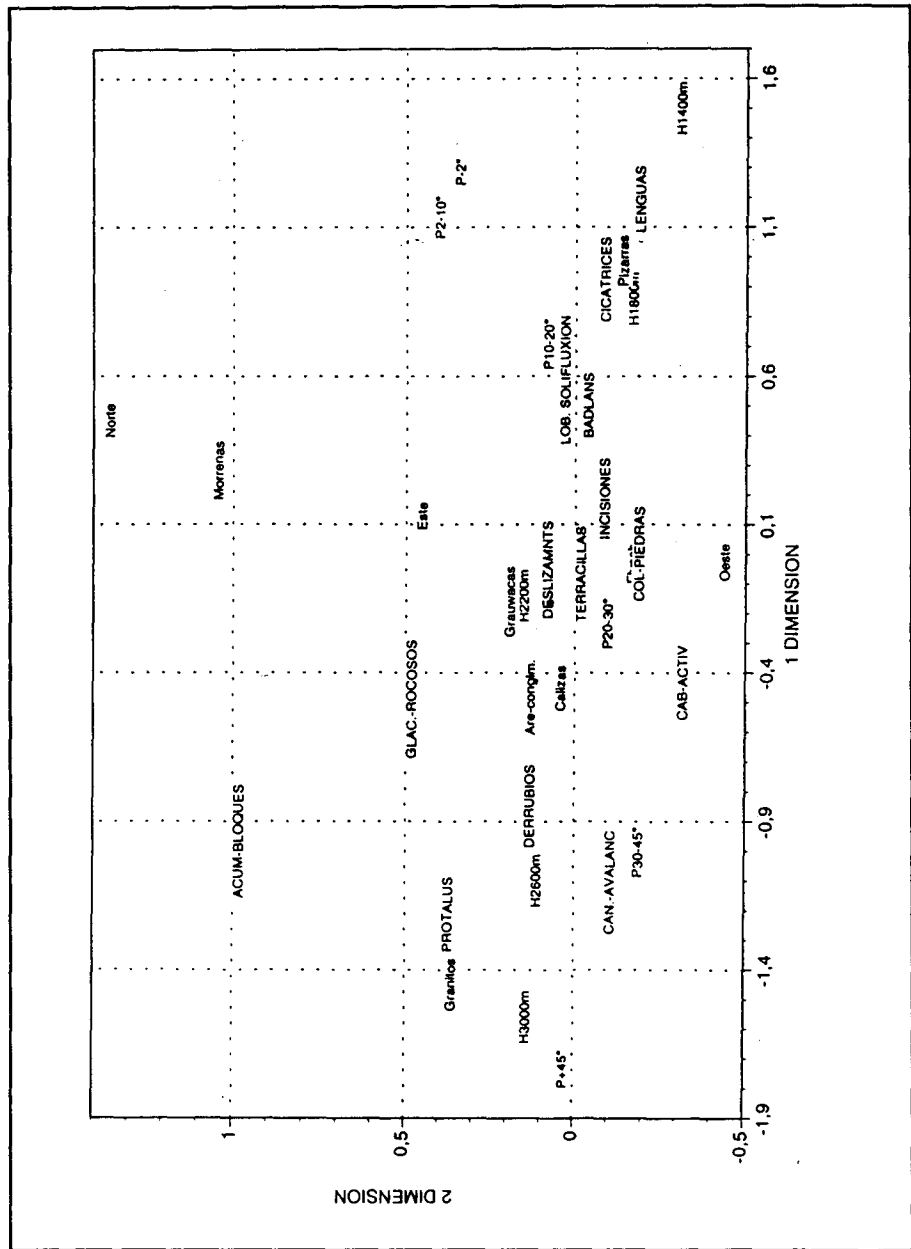


Fig. 2. Coordenadas de las categorías multivariantes en la primera y segunda dimensión del análisis de componentes principales (PRINCALS).

Los análisis multivariantes han demostrado que algunas geoformas son difíciles de diferenciar, seguramente porque a la escala a la que se ha trabajado no se pueden introducir los matices topoclimáticos y microtopográficos. Lo más importante es que a partir del Análisis Discriminante y de un análisis jerárquico de cluster se definen tres grupos de geoformas que presentan un comportamiento espacial muy parecido y que responden a similares interacciones de factores ambientales.

Un primer grupo se halla claramente influido por la presencia de pizarras en altitudes moderadas, dando lugar al predominio de movimientos en masa "naturales", ligados a la intensa meteorización y tectonización de las pizarras y a la plasticidad de los suelos, lo que explica la presencia de cicatrices de arranque, grandes lenguas de despegue y lóbulos de solifluxión.

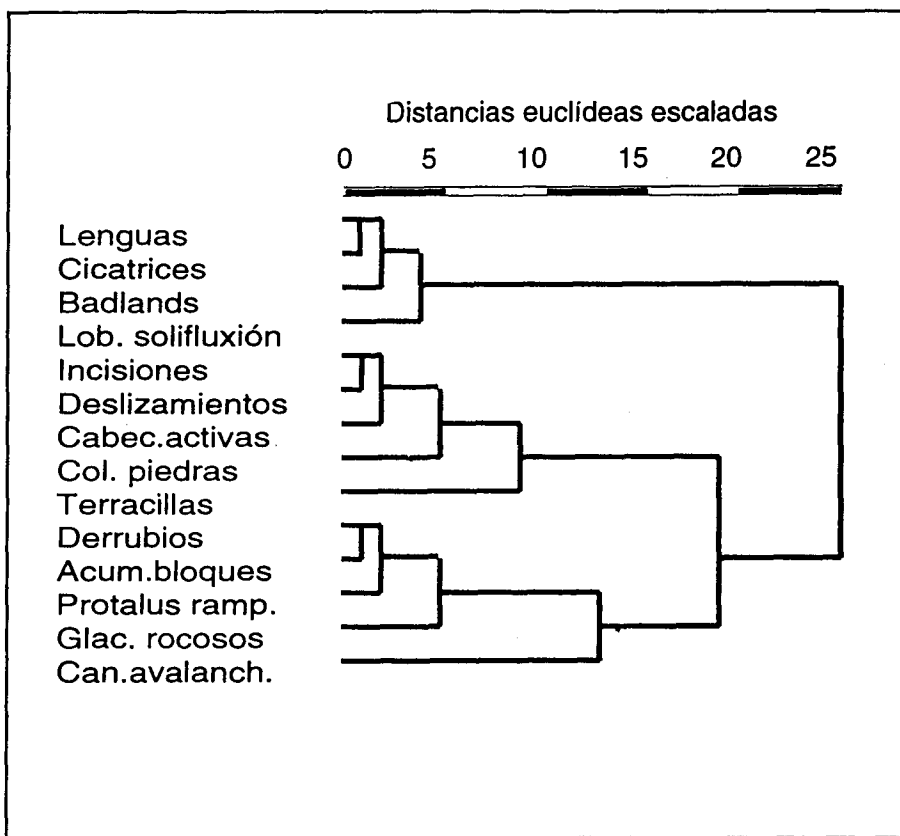


Fig. 3. Dendrograma jerárquico del análisis de cluster realizado sobre las clases geomorfológicas.

Igualmente la facilidad con que pueden erosionarse algunos sectores pizarrosos poco permeables provoca la expansión local de áreas de badlands.

En el extremo opuesto, otro grupo se halla relacionado con litologías resistentes y ambiente periglacial (o al menos muy afectado por la acción del hielo y la nieve). De ahí la presencia de derrubios de gravedad, protalus ramparts y glaciares rocosos en las áreas más elevadas y pendientes de granitos, calizas y areniscas. Los canales de avalanchas también se incluyen en este grupo, aunque su rango altitudinal es sensiblemente mayor.

Por último, otro grupo parece estar más relacionado con las actividades humanas en alta montaña. En él se incluyen movimientos en masa superficiales (terracillas, deslizamientos planares, coladas de piedras, pero no los lóbulos de solifluxión, que responderían a factores más naturales), bastante indiferentes de la litología, y formas relacionadas con la erosión hídrica (incisiones paralelas y cabeceras activas de torrentes). Todas ellas tienden a aparecer con mayor frecuencia entre 1.800 y 2.200 m s.n.m., es decir, en el espacio más afectado por la deforestación. En ese ámbito altitudinal el bosque original fue bruscamente eliminado para favorecer la expansión de los pastos supraforestales, lo que propició un incremento de los aportes detríticos hacia los lagos a partir del siglo XI (MONTSERRAT, 1991).

El método utilizado ha permitido confirmar la gran importancia de la litología y de la altitud (y a través de ésta, del clima) en la distribución de las formas activas de relieve en alta montaña. Igualmente se ha podido identificar estadísticamente a un grupo de geoformas -actualmente muy dinámicas- cuya importante expansión superficial está relacionada con actividades humanas.

REFERENCIAS.

- DEL BARRIO, G. & PUIGDEFÁBREGAS, J. (1987): "Mass wasting features above the timberline in the Central Pyrenees, and their topographic controls. *Pirineos*, 130: 29-51.
- GARCÍA RUIZ, J. M. & PUIGDEFÁBREGAS, J. (1982): "Formas de erosión en el flysch eoceno surpirenaico. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 8: 85-128.
- GARCÍA RUIZ, J. M. (1989): *Mapa Geomorfológico. Sallent*. Geoforma Ediciones, 29 pp. + 1 mapa a escala 1:50.000, Logroño.
- GARCÍA RUIZ, J.M., PUIGDEFÁBREGAS, J. & CREUS, J. (1985): *Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón*. Instituto de Estudios Altoaragoneses, 224 pp., Huesca.

ITGE (1990): *Memoria del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, nº 145, Sallent*, 61 pp. Madrid.

MONTSERRAT, J. (1991): *Evolución glacial y postglacial del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo: Estudio palinológico*. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza.