

# LOS ALUDES DE NIEVE EN EL MACIZO DE PEÑALARA

Juan Antonio Fernández-Cañadas López-Peláez<sup>1</sup> Luis Pantoja Trigueros<sup>2</sup> y  
María Palomo Segovia<sup>3</sup>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

<sup>1</sup>jfernandezcanadasl@aemet.es, <sup>2</sup>lpantojat@aemet.es, <sup>3</sup>mpalomos@aemet.es

*RESUMEN: Las zonas de montaña presentan una exposición natural a ciertos riesgos naturales entre los que se encuentra el desencadenamiento de aludes. A pesar de que nuestro país no presenta, en general, un riesgo elevado de desencadenamiento de aludes, el número de víctimas por ellos se ha ido incrementando en las últimas décadas debido a la creciente ocupación de las áreas de montaña. Todos estos hechos hacen que el estudio y el análisis de la dinámica de aludes, tanto en su vertiente espacial como temporal, presente cada vez mayor interés. En este trabajo se han analizado los aludes registrados en el macizo de Peñalara, ubicado en el Sistema Central y se ha utilizado una metodología basada en el uso de sistemas de información geográficos (SIG) para localizar áreas favorables al desencadenamiento de aludes en este macizo.*

## INTRODUCCIÓN

Un alud es un desplazamiento rápido de una masa de nieve por la ladera de una montaña. Cuando el volumen de nieve que se pone en movimiento es pequeño y el recorrido de la nieve no es muy extenso se denomina colada.

La probabilidad de que en un área se desencadene un alud en un momento dado depende de dos tipos de variables:

- Variables meteorológicas y nivológicas como la precipitación, la temperatura, el viento y el estado y la evolución del manto nivoso. Estas variables son independientes del terreno y sufren importantes variaciones temporales.
- Variables relacionadas con el terreno, permanentes y susceptibles de ser cartografiadas, entre las que se encuentran la altitud, la pendiente, la morfología y la rugosidad del terreno, la vegetación existente y la orientación.

Existen numerosas clasificaciones de aludes en función del contenido de agua líquida que contiene la nieve movilizada, sus características morfológicas, el espesor del manto que se pone en movimiento o de la capacidad destructiva de la avalancha. En este trabajo se utilizará la clasificación utilizada por AEMET basada en la establecida, en 1981, por la Comisión Internacional de Nieve y Hielo (UNESCO). Esta clasificación distingue:

- Aludes de placa. Presentan una zona de salida en la que la nieve forma una placa que suele ser compacta y seca. La salida es lineal, puede ser larga y depende de la topografía del terreno.
- Aludes de nieve reciente. La nieve que se pone en movimiento suele ser seca y fría y presenta una cohesión muy débil. La salida suele ser puntual. Se suelen desencadenar durante o poco después de las nevadas.
- Aludes de fusión o de nieve húmeda. Se desencadenan en mantos de nieve con un alto contenido en agua líquida. La salida puede ser lineal o puntual y la elevada densidad de la nieve que se pone en movimiento hace que se puedan producir a partir de bajas en torno a 25°. (G UYOMARC'H, 1996).

## ÁREA DE ESTUDIO

El macizo de Peñalara forma parte de la sierra de Guadarrama que, a su vez, constituye una de las unidades que componen el Sistema Central. La línea de cumbres de esta cadena es el límite entre las comunidades autónomas de Madrid y de Castilla y León (figura 1). Además, este macizo está incluido en el Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama declarado por Ley el 13 de junio de 2013.

El relieve de Peñalara es el resultado de la acción de distintos procesos de tipo estructural y climático. La actividad tectónica y climática sobre los materiales gneísecos existentes ha dado como resultado un macizo montañoso que se caracteriza por su fuerte asimetría espacial.

A finales del Pleistoceno, el descenso de las temperaturas y la abundancia de precipitaciones sólidas propiciaron la instalación de los glaciares en la sierra (PALACIOS Y ANDRÉS, 2005). Los glaciares más activos se encontraban en las laderas con orientación este, protegidos de los vientos dominantes

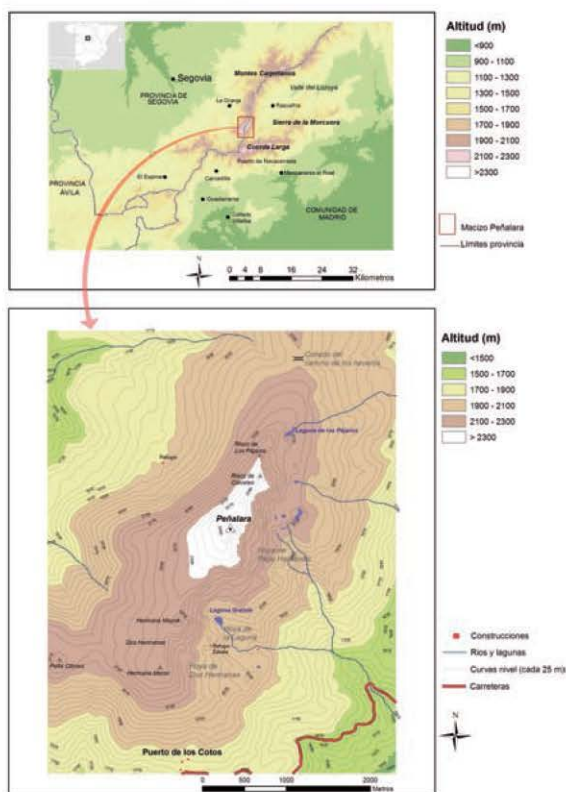


Figura 1. Mapa de situación del macizo de Peñalara. (Elaboración propia).

meteorológico del puerto de Navacerrada, situado a 1888 m de altitud y a unos 5 km de distancia del sector central del macizo.

Las precipitaciones superan los 1400 l/m<sup>2</sup> anuales y se concentran en los meses más fríos, desde octubre a mayo, gran parte de ellas en forma de nieve. El verano es árido. La temperatura media anual en el puerto de Navacerrada es de 6,1 °C, y la temperatura media mensual es menor de 0 °C en los meses más fríos (desde diciembre a febrero). Estos datos nos indican que estamos hablando de un clima de alta montaña mediterránea con rasgos continentales (PALACIOS y otros, 2006). La nieve es el meteoro más representativo de este macizo montañoso.

El manto nivoso se caracteriza por su irregularidad inter e intra anual. De esta manera hay inviernos en los que se producen importantes precipitaciones de nieve que pueden acumular un gran espesor, y otros con espesores de nieve muy reducidos. En el macizo de Peñalara, las nevadas copiosas suelen producirse por advecciones de aire relativamente cálido del tercer cuadrante.



Figura 2. Ejemplos de cornisas. (Foto: L. Pantoja).

y de la máxima radiación solar. Los hielos alcanzaron un espesor de hasta 300 m en algunos puntos, una longitud máxima de 1,65 km y cubrieron el suelo de zonas situadas a una altitud mínima estimada de 1840 m en el glaciar de Peñalara.

La asimetría en la distribución de los glaciares tuvo importantes consecuencias geomorfológicas. En las vertientes orientales, los glaciares provocaron la aparición de morfologías como morrenas, circos, depresiones, etc., mientras que en las laderas orientadas al oeste, donde la presencia glaciaria fue menos importante, el manto de alteración permanece inalterado en la mayor parte de estos sectores (PALACIOS y otros, 2006).

Esta marcada asimetría este-oeste del macizo en su aspecto geomorfológico se refleja en otras facetas como la distribución y la persistencia del manto de nieve o en las relacionadas con la distribución de la vegetación (PALACIOS y otros, 2006).

En la actualidad, la actividad geomorfológica más relevante en esta área está relacionada con los procesos ligados a la acción nival, que ha dado lugar a la aparición de numerosos nichos de nivación en las áreas en las que la acumulación y la persistencia de la nieve es mayor y que coincide, en general, con las cabeceras de los glaciares pleistocenos (PALACIOS Y ANDRÉS, 2000).

La caracterización climatológica del macizo de Peñalara puede realizarse a partir de los datos de la serie del observatorio

El número de días en los que la nieve cubre el suelo varía entre un mínimo de menos de 20 días en el invierno 1994-1995 y un máximo de 182 días en el invierno 1990-1991. La nieve tiende a acumularse a sotavento de los vientos dominantes. Por lo tanto, en el macizo de Peñalara, las acumulaciones más importantes tienden a formarse en la zona de los circos que tienen orientación este (noroeste a suroeste). Así, en la zona cercana a las cumbres, a sotavento de los vientos del oeste, se forman importantes cornisas y placas en las que la acumulación de nieve es muy intensa, de más de una decena de metros de espesor (figura 2).

## **MATERIALES, DATOS Y MÉTODOS**

El estudio de los aludes observados y la información meteorológica y nivológica se ha realizado a partir de las observaciones y sondeos nivológicos realizados por parte del Grupo de Predicción de Aludes de la Delegación Territorial de la Agencia Estatal de Meteorología en Madrid y por personal del Parque de Peñalara. A dichos sondeos, que se realizan semanalmente, se les añade información complementaria como tests de estabilidad de la nieve y aludes observados. También, se realizan observaciones adicionales cuando las condiciones nivológicas lo hacen necesario que permiten tener un conocimiento del estado de la nieve y de las características de las avalanchas que se producen.

Además, se ha recopilado información del Grupo Especial de Rescate de la Comunidad de Madrid (GERA), el Grupo de Rescate en Montaña de la Guardia Civil (GREIM), la Guardería Forestal del Parque Natural, de guías de montaña, y de excursionistas y montañeros expertos conocedores de la zona que han colaborado en la localización y caracterización de los aludes observados y en la cartografía de estos.

Como cartografía digital base se ha hecho uso del Modelo Digital del Terreno (MDT) suministrado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), con paso de malla de 5 m, formato de archivo ASCII matriz ESRI (agr), distribución oficial de hojas 1:25 000 y sistema geodésico de referencia ETRS89.

La fotointerpretación del área de estudio y la determinación de la morfología de las laderas, la cubierta forestal y la cubierta nivosa se ha realizado a partir de las ortofotos digitales de los vuelos PNOA, en formato TIFF con el correspondiente fichero TFW de georreferenciación del IGN con tamaño de pixel 0,25 m. También se consultaron imágenes del satélite SPOT-5 de 5 m de resolución espacial en modo pancromático para comprobar la extensión del terreno cubierto por la nieve.

### **Cartografía de aludes observados**

Partiendo de la información recopilada directamente en el campo o mediante encuestas se ha elaborado una base de datos y se ha realizado una cartografía de aludes observados. Con ayuda del SIG, se ha obtenido una serie de medidas relativas a las dimensiones de estos aludes (longitud, cota máxima, cota mínima, desnivel, área afectada). Esto nos permite adquirir un conocimiento previo de las características de los aludes que se producen en el macizo.

Para la determinación del tamaño de los aludes se ha utilizado la tabla propuesta por la EAWS (*European Avalanche Warning Services*, <http://www.avalanches.org/basics/glossar-es/>) que clasifica los aludes en función de las características de la zona de llegada, la longitud de la trayectoria y el volumen de nieve movilizada y los daños potenciales que el alud puede causar en las personas u otros elementos y sobre el entorno.

### **Cartografía de zonas favorables al desencadenamiento de aludes**

Para determinar las zonas propensas al desencadenamiento de aludes se aplicará la metodología utilizada por el Ministerio de Agricultura francés (CEMAGREF) que consta de 3 fases:

- La fotointerpretación. Estudio e interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite para determinar la morfología de las laderas, la cubierta forestal, la cubierta nivosa y elaboración de una cartografía de los aludes observados. Para caracterizar una ladera se tienen en cuenta factores como la vegetación, las características del terreno, la pendiente, la orientación, la insolación que recibe y la cobertura de nieve que acumula.
- Interpretación de campo. En esta fase se confirman las características de la zona de estudio determinadas por fotointerpretación y se identifican sobre el terreno las zonas de aludes previamente determinadas. Estos trabajos se realizan en ausencia de nieve para poder observar de forma minuciosa la morfología de las laderas.

- Encuestas a la población. Permite completar la información sobre los aludes registrados entre la población residente en la zona en lo que se refiere a tipo, frecuencia, época de caída, límites, etc.

La cartografía de zonas favorables al desencadenamiento de aludes se ha elaborado siguiendo la metodología empleada por PALOMO y otros (2008). Según esta metodología, los factores que influyen en el desencadenamiento de un alud pueden clasificarse en necesarios, cuya ausencia hace muy improbable el desencadenamiento de aludes, y de intensificación, que no condicionan el desencadenamiento pero sí que aumentan la probabilidad de que este se produzca. En este trabajo se han considerado como factores necesarios la presencia de pendientes superiores a 25°, ya que en el caso contrario la nieve no suele ponerse en movimiento, y la ausencia de bosques que disminuyen la probabilidad de desencadenamiento y favorecen la estabilidad del manto. Como factores de intensificación se han considerado la existencia de zonas de acumulación de nieve en la ladera, la orientación de esta hacia el este, que favorece la formación de placas y las acumulaciones de nieve, las zonas con una insolación mínima, en las que la nieve tarda más en evolucionar y se mantiene la probabilidad de desencadenamiento de aludes de nieve reciente, y las zonas con insolación máxima en las que, por el contrario, la nieve evoluciona rápidamente y se favorece, en determinadas condiciones, el desencadenamiento de aludes de fusión.

Todos los factores (tanto los necesarios como los de intensificación) toman el valor 1 en el píxel cuando se cumplen y el valor 0 si no se cumplen.

La combinación de estos factores que se ha utilizado para la elaboración de la cartografía aparece en la figura 3.

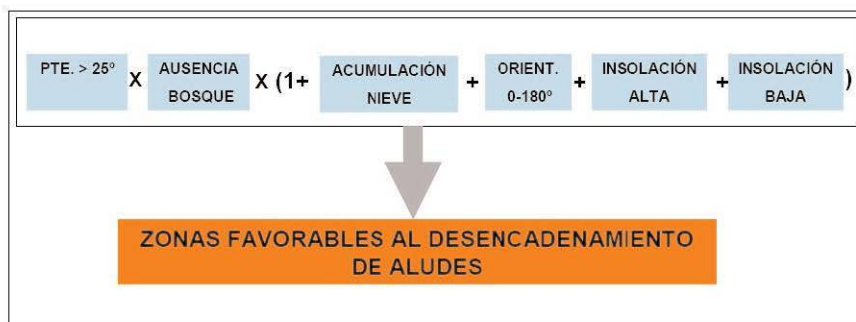


Figura 3. Combinación de factores utilizada para la realización de la cartografía. (Elaboración propia).

De esta forma, cada píxel podrá tomar un valor entre 0 y 4 y se pueden establecer cinco categorías de probabilidad de desencadenamiento: muy bajo (valor 0), bajo (valor 1), moderado (valor 2), alto (valor 3) y muy alto (valor 4).

## RESULTADOS

### Aludes observados

En la figura 4 aparecen cartografiados los aludes observados en el macizo de Peñalara entre los años 2009 y 2013.

El número de aludes registrados en el macizo de Peñalara entre los años 2009 y 2013 es de 35. La mayor parte de los aludes observados se registran en las laderas orientales del macizo. En las vertientes del resto de las orientaciones solo se ha registrado un alud debido a que en esas vertientes la pendiente no es muy acusada, la acumulación de nieve es escasa y la formación de placas no es favorable. Además, el hecho de ser una zona menos transitada hace que la detección de aludes en ella sea menos probable.

La longitud media de los aludes observados es de 194 m aunque la mayor parte de ellos (el 63 %) tienen menos de 200 m de recorrido y solo el 17 % supera los 300 m.

La cota de salida de los aludes observados es, en todos los casos, superior a 2000 m. Solo en dos ocasiones la cota de salida ha sido inferior a 2200 m.

La altitud de llegada es, en un 94 % de los casos, superior a los 2000 m. Solo en dos desencadenamientos la cota de llegada fue inferior a 2000 m y siempre estuvo por encima de 1900 m. La cota mínima alcanzada es de 1980 m.

La superficie afectada por los aludes presenta una alta variabilidad. El valor medio es de 13 837 m<sup>2</sup> pero el 57 % de los aludes observados no alcanzan este valor.

De acuerdo con los criterios establecidos por la EAWS, el tamaño de los aludes registrados en el macizo varía desde coladas, pasando por aludes pequeños y medianos (los más habituales), hasta alguno grande.

El tipo de alud más frecuente es el alud de placa. El 66 % de los aludes observados son de este tipo, de los cuales el 6 % son de placa friable, un tipo de alud que presenta características conjuntas a los de placa y los de nieve reciente y el 34 % de aludes son de fusión o nieve húmeda.

No se han observado aludes de nieve reciente seca, aunque sí existen noticias de su ocurrencia en el macizo como aludes que se inician como ruptura de una placa friable y evolucionan a aludes de nieve reciente. Solo en un caso se tiene constancia del desencadenamiento de un alud de nieve reciente. El evento se produjo en el mes de enero de 2009 cuando un alud de nieve reciente seca provocado por la ruptura de una placa friable, pasó por encima del refugio de Zabala sin provocar ningún daño apreciable pero sí algún accidentado.

Los aludes de fusión observados son coladas, aludes pequeños o, como mucho, medianos. No se han observado marcas ni huellas en el terreno que hagan evidente la ocurrencia de aludes de fusión de tamaño grande ni aludes de fondo.

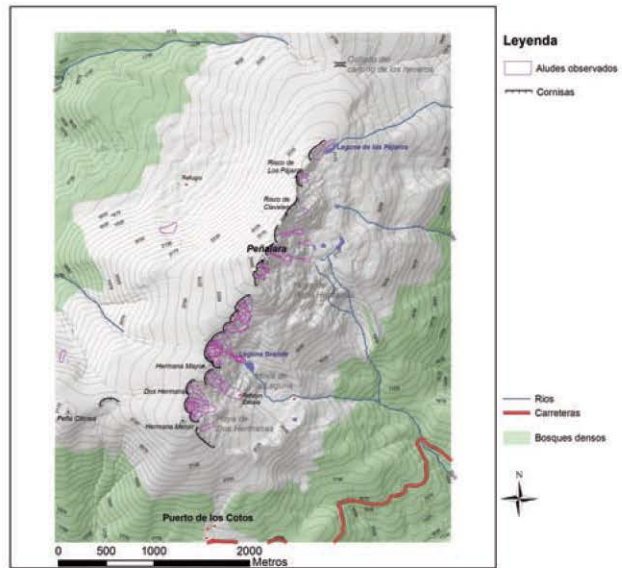


Figura 4. Mapa de aludes observados. (Elaboración propia).

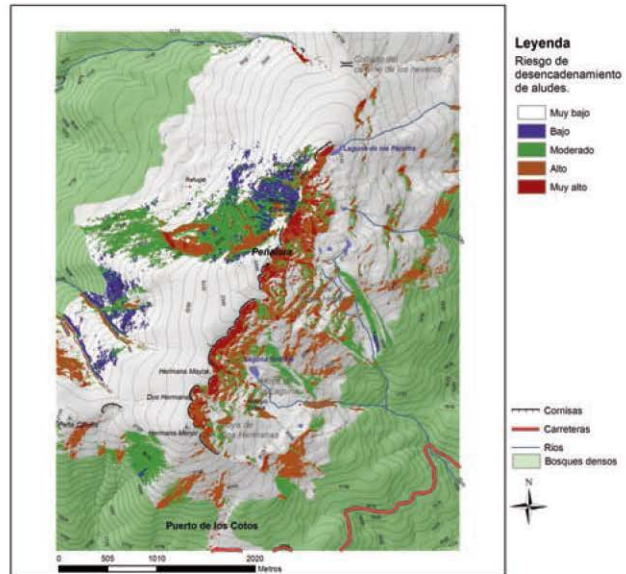


Figura 5. Mapa de áreas favorables al desencadenamiento de aludes en el macizo de Peñalara. (Elaboración propia).

### Cartografía de zonas favorables al desencadenamiento de aludes

La figura 5 muestra, para el macizo de Peñalara, las áreas favorables al desencadenamiento de aludes.

Las áreas con probabilidad muy alta de desencadenamiento se localizan en las cabeceras de los circos glaciares (acumulaciones de nieve elevadas, orientación favorable e insolación elevada), en pequeños sectores de la hoya glaciar orientada al norte (acumulaciones elevadas, orientación



Figura 6. Ejemplo de alud de placa. (Foto: L. Pantoja).

favorable e insolación escasa) y en un pequeño sector del extremo occidental del nicho del Infierno (acumulación elevada, orientación favorable e insolación elevada).

Las zonas con probabilidad alta de desencadenamiento se encuentran en las laderas orientales de los circos glaciares, por debajo de las áreas de máxima acumulación y en aquellas laderas de la vertiente oriental que presentan mayor insolación y orientación favorable. En la hoya situada al norte del macizo, las áreas con probabilidad alta se caracterizan por presentar acumulaciones de nieve elevadas e insolación escasa.

Los sectores con probabilidad moderada de la vertiente este están en las vertientes de las morrenas con orientación favorable, en el extremo

oriental del nicho del Infierno debido a la elevada insolación que recibe y, en la hoya situada al norte, a los sectores centrales de esta, con insolaciones escasas que impiden la evolución y la estabilización de la nieve.

Finalmente, las áreas con probabilidad baja de desencadenamiento son aquellas en las que solo se cumplen los factores necesarios (pendiente superior a 25° y ausencia de bosque) pero ninguno de los de intensificación. Estas áreas se localizan en el extremo oriental de la hoya situada al norte del macizo y en las incisiones torrenciales situadas en la vertiente occidental del macizo.

## CONCLUSIONES

Los aludes suponen uno de los riesgos naturales más importantes que afectan a las áreas de montaña. En España los aludes se presentan de manera habitual en la cordillera pirenaica, aunque esto no significa que en el resto de los sistemas montañosos peninsulares no se produzcan, pero sí que su ocurrencia es más irregular y su tamaño generalmente menor.

En el macizo de Peñalara la nieve se caracteriza por su gran variabilidad inter e intra anual, como corresponde a un clima mediterráneo continentalizado de montaña. Esta irregularidad en la presencia de nieve en el macizo se traslada a la frecuencia de desencadenamiento de aludes en él.

Los aludes en el macizo de Peñalara tan solo se producen en las zonas más altas, por encima de 1900 m, por lo que no afectan a las construcciones ni a las infraestructuras. De todas formas, el aumento del número de personas que visitan el macizo y se adentran incluso en las zonas potencialmente más peligrosas hacen que la probabilidad de



Figura 7. Ejemplo de alud de fusión. (Foto: L. Pantoja).

encuentro alud-persona sea elevada. Con la nueva figura de protección que afecta a la zona de estudio, sería oportuno incorporar al Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional información sobre las zonas más expuestas a los aludes.

Los aludes que se producen más frecuentemente en el macizo son los aludes de placa, siendo también los que más accidentes provocan. Este tipo de aludes se desencadenan preferentemente en las laderas del macizo con orientación este, debido a que estas vertientes son las más propicias a la formación de placas. La mayor parte de las placas se forman a sotavento de los vientos dominantes, en las zonas inmediatamente inferiores a las líneas de cumbres. En muchos casos están acompañadas de cornisas de nieve. Los aludes de placa pueden producirse en cualquier momento del invierno y no están necesariamente ligados a una situación meteorológica determinada porque las placas pueden persistir durante largo tiempo.

Los aludes de fusión son escasos, y tienden a producirse en primavera aunque también se han observado en otros periodos del invierno coincidiendo con una temporada de temperaturas altas. Suelen ser coladas, aludes pequeños o medianos, y en ningún caso, se han visto aludes de fondo.

Los aludes de nieve reciente se producen tras un periodo de nevadas intensas. En el macizo de Peñalara se han observado, de forma esporádica, aludes de placa friable que evolucionan a aludes de nieve reciente.

Es necesario continuar aumentando el contenido de la base de datos de registros nivológicos, para comprobar la validez del mapa de riesgo de aludes que se ha realizado o modificarlo si es necesario. En este sentido, sería conveniente ampliar las observaciones a otras áreas de la sierra de Guadarrama y Somosierra.

## REFERENCIAS

- ALÍA, M., J. MENÉNDEZ y C. VIDAL, 1957: «Livret-Guide de l'excursion C3 et C4 Guadarrama, Massif de Peñalara et variation El Escorial-Manzanares el Real», en *Actas V Congreso Internacional INQUA*. Madrid, 28-34.
- COLEOU, C., G. GIRAUD y J. VILLECROSE, 1993: Análisis de los sondeos por golpeo. Grenoble (Francia), Météo-France, CNRM CEN, Traducción del CMT de Aragón, La Rioja y Navarra (INM).
- GUYOMARCH, G., 1996: Les avalanches. Grenoble (Francia), Météo-France, CNRM CEN. Traducción del CMT de Aragón, La Rioja y Navarra (INM).
- JULIÁN, A. y J. CHUECA, 2010: Cartografía de zonas probables de salida de aludes en el Alto Gállego (Pirineo Central Aragonés) mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 36, 27-41.
- PALACIOS, D. y N. ANDRÉS, 2000: Morfodinámica supraforestal actual en la Sierra de Guadarrama y su relación con la cubierta nival: el caso de Dos Hermanas-Peñalara». En: J. L. PEÑA, M. SÁNCHEZ-FABRE y M. V. LOZANO (eds.): *Procesos y formas periglaciares en la montaña mediterránea*. Teruel, Instituto de Estudios Turolenses, 235-264.
- PALACIOS, D. y N. ANDRÉS, 2005: Relación entre dinámica nival y erosión en el Parque Natural de Peñalara y áreas próximas. En *Quintos encuentros científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Paular*. El Paular, Rascafría (Madrid), 95-137.
- PALACIOS, D. y N. ANDRÉS, 2006: El significado geográfico de la nieve en la dinámica natural de la Sierra de Guadarrama. Madrid, Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña de la Universidad Complutense de Madrid. [Consulta: enero 2013]. Disponible en: <https://portal.ucm.es/web/gfam/recursos>.
- PALOMO, M., 2007: Los aludes en el circo de Piedrafita (Pirineo Aragonés). El evento del 8 de febrero de 1996. *Boletín Glaciológico Aragonés*, 8, 61-83.
- PALOMO, M., A. JULIÁN y J. CHUECA, 2008: Aplicación de un análisis multicriterio a la delimitación de zonas probables de aludes (valle del Aguas Limpias, Pirineo central español). En: J. BENAVENTE y F. J. GRACIA (eds.): *Trabajos de Geomorfología en España, 2006-2008*. Cádiz, Sociedad Española de Geomorfología, 417-420.
- SANZ, C., 1986: Periglaciario en montaña: La Sierra de Guadarrama. En E. MARTÍNEZ DE PISÓN (ed.): *Atlas de Geomorfología*. Madrid, Alianza editorial, 239-254. European Avalanche Warning Services [Consulta: noviembre 2013]. Disponible en: <http://www.avalanches.org/basics/glossaries/#c83799>.