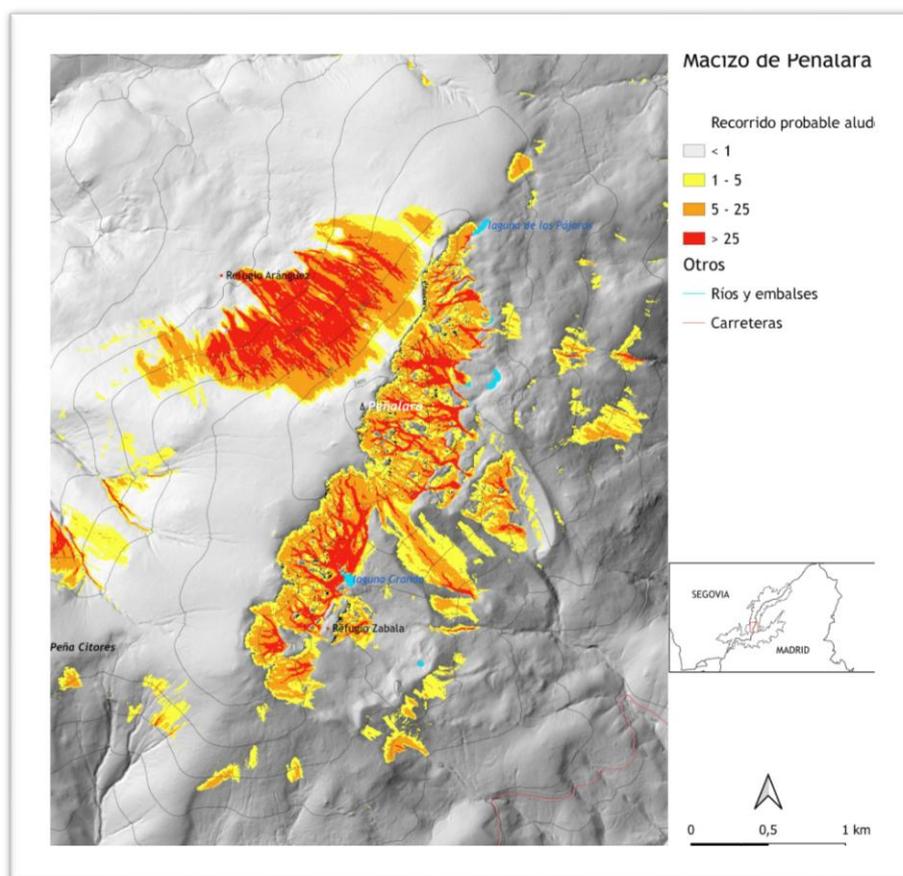


# CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS SUSCEPTIBLES A ALUDES EN LA SIERRA DE GUADARRAMA MEDIANTE EL MODELO *GRAVITATIONAL PROCESS PATH*



**Nota técnica 43 de AEMET**  
**Versión 1.0**

Andrés CHAZARRA BERNABÉ  
Juan Antonio FERNÁNDEZ-CAÑADAS LÓPEZ PELÁEZ  
Luis PANTOJA TRIGUEROS  
Alberto PANTOJA DORDA



**Madrid, 2025**

## TÍTULO

Caracterización de las zonas susceptibles a aludes en la sierra de Guadarrama mediante el modelo *Gravitational Process Path*

## AUTORES

Andrés Chazarra Bernabé  
Juan Antonio Fernández-Cañadas López Peláez  
Luis Pantoja Trigueros  
Alberto Pantoja Dorda

*achazarrab@aemet.es, jtcandadas@gmail.com, lpantojat@gmail.com, pantojaski@gmail.com*

© del texto y de las imágenes: los autores, excepto donde se indique otra fuente.

## PORTADA

Zonas potenciales de recorrido aludes obtenidas a partir del modelo *Gravitational Process Path* en el macizo de Peñalara. Elaboración propia.



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

### Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico  
Agencia Estatal de Meteorología  
Madrid, 2025

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:  
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-25-004-2  
<https://doi.org/10.31978/666-25-004-2>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)  
C/ Leonardo Prieto Castro, 8  
28040 Madrid  
<http://www.aemet.es/>

 @Aemet\_Esp

 <https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

## Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Datos y metodología .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Zona de estudio .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Modelo <i>Gravitational Process Path (GPP)</i> .....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Registro histórico de aludes observados en la sierra de Guadarrama .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4 Determinación de las zonas potenciales de salida de aludes .....</b>	<b>10</b>
<b>3 Resultados .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Zonas potenciales de salida de aludes.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Zonas potenciales de recorrido de aludes .....</b>	<b>12</b>
<b>4 Conclusiones.....</b>	<b>15</b>
<b>5 Referencias .....</b>	<b>16</b>

## Abreviaturas

- **AEMET:** Agencia Estatal de Meteorología
- **ATES:** *Avalanche Terrain Exposure Scale*
- **GIS:** *Geographic Information System*
- **GPP:** *Gravitational Process Path*
- **SAGA:** *System for Automated Geoscientific Analyses*
- **SIG:** Sistema de Información Geográfica

## Resumen

En el presente trabajo se muestran los resultados que se han obtenido al estimar las zonas potenciales de salida y de recorrido de aludes en la sierra de Guadarrama utilizando el modelo *Gravitational Process Path*. El modelo se calibró a partir de un detallado registro histórico de aludes observados en la zona de estudio, y se aplicó utilizando un modelo digital de elevaciones y un modelo de vegetación de alta resolución para estimar las áreas propensas a aludes en zonas cercanas donde no existe un registro detallado de avalanchas de nieve. Finalmente, se realizó una validación de los resultados obtenidos comparándolos con los aludes observados, comprobándose la validez del modelo para estimar las zonas propensas a las avalanchas de nieve en zonas donde no se dispone de una información exhaustiva de la ocurrencia de aludes.

**Palabras clave:** aludes, modelo *Gravitational Process Path*, Escala Europea de Peligro de Aludes, clasificación ATES, sierra de Guadarrama, sistemas de información geográfica.

## 1 Introducción

Desde 2009, la Agencia Estatal de Meteorología emite, durante la época del año en la que la cubierta de nieve es significativa, boletines nivológicos y de peligro de aludes para la sierra de Guadarrama con una periodicidad semanal. En ellos se informa sobre el estado del manto nivoso y se evalúa el nivel de peligro de aludes conforme a la Escala Europea de Peligro de Aludes (Müller et al., 2023), con valores comprendidos entre 1 y 5. Además, se da una estimación del tamaño de las avalanchas que puedan ocurrir y se describen las zonas, orientaciones y altitudes en las que son más probables. Esta información resulta fundamental tanto para el usuario general (montañeros, esquiadores fuera de pista, etc.) como para los organismos responsables de la gestión y de la seguridad de los recursos de montaña, ya que permite obtener una idea general de las zonas en las que hay mayor probabilidad de ocurrencia de aludes en función de las condiciones nivometeorológicas presentes y previstas, y facilita tomar las decisiones oportunas para evitar posibles accidentes.

Las descripciones incluidas en los boletines de peligro de aludes de las zonas propensas a la ocurrencia de avalanchas son, por definición, generales, limitándose normalmente a informar sobre las orientaciones y las altitudes en las que son más probables. Es necesario tener un conocimiento detallado del terreno y una amplia experiencia en la ocurrencia de aludes en la zona para poder distinguir con cierta precisión aquellas zonas en las que la probabilidad de ocurrencia de avalanchas es significativa y, por tanto, deben evitarse, de aquellas otras zonas que pueden considerarse, en cambio, seguras. La mayoría de los usuarios a los que están destinados los boletines de peligro de aludes carece de este conocimiento, por lo que resulta aconsejable complementar los boletines con información adicional que permita al usuario conocer las zonas en las que la probabilidad de ocurrencia de accidentes debidos a aludes es mayor en función del peligro previsto.

Con este fin, se desarrolló en Canadá a comienzos del siglo XXI la clasificación ATES (*Avalanche Terrain Exposure Scale*), la cual permite evaluar el grado de exposición del terreno a los aludes en función de sus características intrínsecas, como pendiente, orientación, etc. (Statham et al., 2006). Es una herramienta que complementa a los boletines de peligro de aludes y que resulta fundamental para la gestión del riesgo asociado a aludes, ya que permite distinguir, en función del peligro previsto en el boletín, las zonas en las que la probabilidad de ocurrencia de accidentes debidos a aludes es mayor. Su uso se ha ido extendiendo con el tiempo a los principales sistemas

montañosos de todo el mundo en los que se emiten boletines de peligro de aludes. La clasificación original utiliza once características del terreno para clasificar el grado de exposición del terreno a las avalanchas en una escala de tres niveles. Recientemente se ha publicado una versión actualizada, denominada ATES v.2, que utiliza una lista simplificada de ocho características del terreno para realizar una clasificación del terreno con una escala expandida a cinco niveles (Statham y Campbell, 2023).

A pesar de su indudable utilidad, la clasificación ATES presenta el inconveniente de resultar en parte subjetiva, ya que depende en cierta medida del criterio y la experiencia del desarrollador a la hora de clasificar el terreno en los diferentes niveles. Clasificaciones ATES de una misma zona realizadas por distintos desarrolladores pueden dar lugar a resultados diferentes, sin que resulte sencillo dilucidar, a menos que se posea un exhaustivo conocimiento de la zona, qué clasificación es más acertada.

En los últimos años, se han desarrollado nuevas herramientas para sistemas de información geográfica (SIG) que permiten modelizar, a partir de modelos digitales del terreno de alta resolución, las zonas propensas a la generación de aludes y el recorrido que tendrían los aludes en caso de producirse. Estas herramientas permiten complementar la información proporcionada por los boletines de peligro de aludes de forma similar a la clasificación ATES, con la ventaja de presentar una mayor objetividad al estar basados en modelos físicos, además de ser fácilmente reproducibles. Idealmente, los parámetros del modelo deben calibrarse en cada zona a partir de registros históricos de aludes observados.

En el presente trabajo se muestran los resultados que se han obtenido al estimar las zonas potenciales de salida y de recorrido de los aludes en la sierra de Guadarrama utilizando el modelo *Gravitational Process Path* (Wichmann, 2017), implementado en el sistema de información geográfica libre SAGA GIS. El modelo se calibró utilizando un detallado registro histórico de aludes observados en la zona de estudio, principalmente en el macizo de Peñalara.

Los resultados de este trabajo se han utilizado para realizar la clasificación ATES v.2 de la sierra de Guadarrama incluida en la publicación *Mapa de clasificación del terreno por exposición al peligro de aludes (ATES) de la sierra de Guadarrama* (Pantoja et al., 2025).

## 2 Datos y metodología

### 2.1 Zona de estudio

La sierra de Guadarrama forma parte del sistema Central, sistema montañoso del centro de la península ibérica que se eleva sobre la meseta castellana separando las cuencas del Duero y del Tago. La sierra de Guadarrama se extiende en dirección suroeste-noreste entre las provincias de Ávila, Madrid y Segovia, abarcando desde la sierra de Malagón hasta la Somosierra (Muñoz y Sanz, 1995).

La zona de estudio del presente trabajo (figura 1) coincide con el área considerada en los boletines de peligro de aludes de la sierra de Guadarrama. Se trata, básicamente, de aquellas zonas con una altitud superior a 1500 m situadas al norte del Alto del León y al sur del puerto de Linera, entre las provincias de Madrid y Segovia.

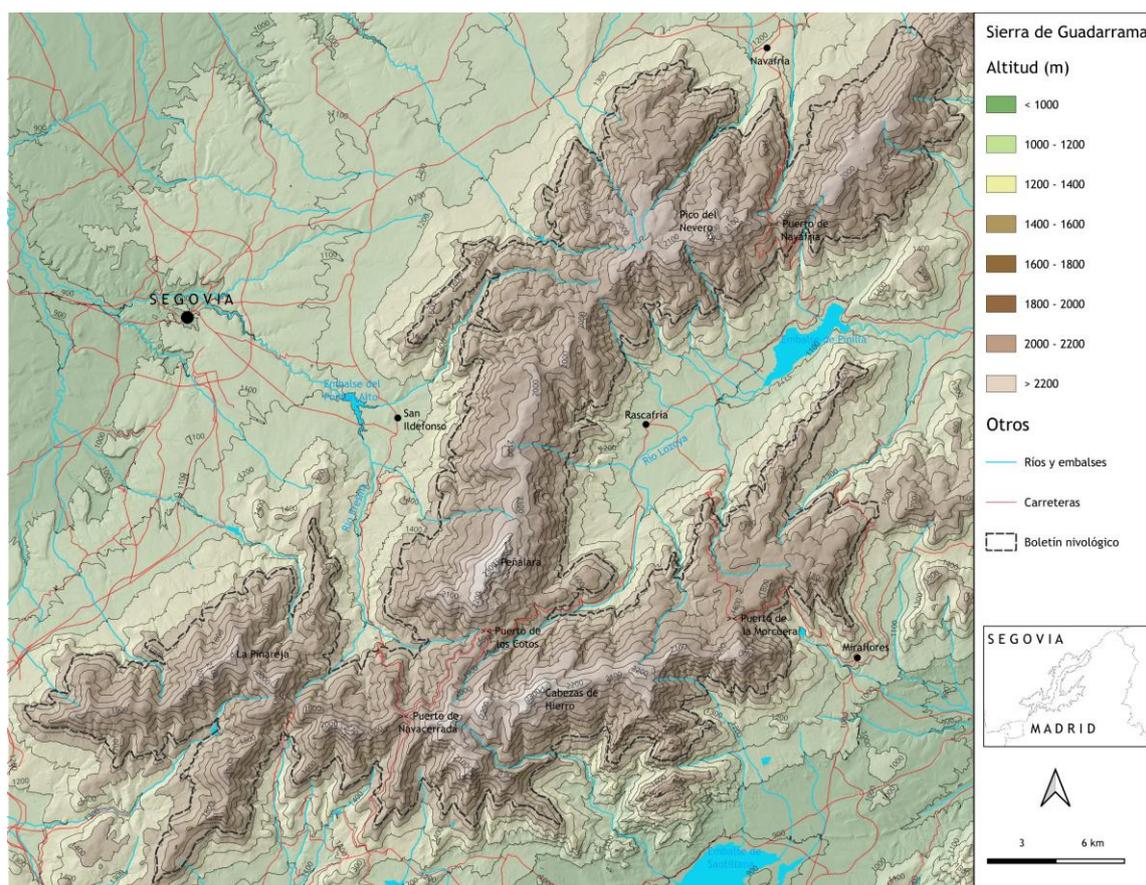


Figura 1. Límites de la zona de estudio.

Comprende, por tanto, las zonas de mayor altitud de la sierra de Guadarrama, incluyendo la sierra de Quintanar, la Cuerda Larga, el macizo de Peñalara y los montes Carpetanos. La zona de estudio abarca la mayor parte del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, quedando excluidas únicamente las zonas del Parque Nacional que tienen una altitud inferior a 1500 m. Se extiende aproximadamente 38 km de este a oeste y 33 km de norte a sur.

## 2.2 Modelo Gravitational Process Path (GPP)

Este modelo proporciona una simulación de procesos gravitacionales a partir de un modelo digital de elevaciones de alta resolución (Wichmann, 2017). Esta herramienta está integrada en el sistema de información geográfica libre SAGA GIS (Conrad, 2015). El modelo conceptual combina varios componentes (recorrido, longitud de salida, llenado de depresiones y depósito de material) para simular el movimiento de una masa desde un punto de salida hasta el área de deposición. Para cada componente hay varios modelos disponibles, gracias a lo cual la herramienta se puede configurar para diferentes procesos, como desprendimientos de rocas, flujos de lodo o avalanchas de nieve. La herramienta se puede aplicar tanto al modelado de eventos individuales localizados como al cartografiado a escala regional de la susceptibilidad a peligros naturales. En el presente estudio, el modelo se ha utilizado para evaluar y cartografiar las zonas de la sierra de Guadarrama susceptibles a la ocurrencia de aludes.

Una parte fundamental de la clasificación de las zonas propensas a los aludes es la delimitación de los recorridos de las posibles avalanchas de nieve, la cual requiere conocer previamente las áreas potenciales de salida de aludes para utilizarlas en el modelo como puntos de salida.

Este proceso implica modelados empíricos, estocásticos y físicos, y proporciona además la opción de modificación del terreno debido a la deposición de material durante el proceso. Pueden obtenerse así resultados realistas con la gran ventaja de necesitar únicamente un conjunto de parámetros de entrada (Wichmann, 2017).

Básicamente, el *Gravitational Process Path* simula el movimiento de una masa de nieve sobre un modelo digital de elevaciones desde un punto de inicio hasta la zona de deposición. Los puntos de inicio están agrupados en lo que se denominan áreas de salida, formadas por una o más celdas consideradas como zonas potenciales de salida de aludes. Esta capa de información en formato rejilla con las áreas de salida de aludes debe ser creada previamente, para ser utilizada a continuación en la ejecución del modelo GPP.

El GPP calcula una serie de realizaciones del modelo para cada celda de salida mediante una simulación de Monte Carlo. Cada iteración da lugar a un resultado diferente debido a las componentes estocásticas del modelo, siendo el resultado final la superposición de todas las iteraciones.

Es posible elegir entre dos enfoques diferentes para el modelado del recorrido de los aludes: *maximum slope* (pendiente máxima), propuesto por O'Callaghan y Mark (1984), según el cual la partícula sigue en cada momento la trayectoria con mayor pendiente, resultando un modelo determinista; y *random walk* (camino aleatorio), propuesto por Gamma (2000), el cual utiliza un método estocástico para definir la trayectoria que hace posible modelar la dispersión lateral de un proceso mediante el cálculo de diferentes iteraciones a partir de una misma posición de salida.

El resultado de las diversas iteraciones del modelo es una capa ráster que muestra la frecuencia de transición en cada celda, es decir, cuántas veces ha sido atravesada por una partícula procedente de las zonas de salida de aludes.

En cuanto a la modelización de la distancia de deposición de una partícula, el GPP tiene implementados diversos modelos, entre ellos el modelo PCM (Perla et al., 1980), específicamente diseñado para calcular las distancias de deposición de las avalanchas de nieve. Están disponibles distintos modelos de deposición del material, incluyendo el relleno de depresiones, pudiendo una partícula superar una depresión una vez ha quedado rellena y continuar su descenso.

Para la modelización de los aludes de la sierra de Guadarrama a escala regional se aplicó el GPP utilizando el modelo *random walk* para el recorrido de los aludes y el modelo PCM para la distancia de deposición, siguiendo las recomendaciones de Wichmann (2017) para los casos de avalanchas de nieve. Los parámetros de estos modelos, partiendo inicialmente de los rangos de valores sugeridos por Wichmann para la modelización de avalanchas de nieve, se ajustaron de forma que el recorrido de los aludes modelizados se correspondiera de la forma más fiel posible al recorrido de los aludes históricos cartografiados.

## 2.3 Registro histórico de aludes observados en la sierra de Guadarrama

En el caso de la sierra de Guadarrama, se dispone de un detallado registro cartográfico con los aludes observados desde 2009 (Fernández-Cañadas, 2014), habiéndose constatado desde esa fecha más de doscientos. Este registro ha sido posible gracias al esfuerzo realizado por Alberto Pantoja Dorda y Álvaro Pantoja Dorda (asociación deportiva RECmountain) y por el personal del Observatorio Meteorológico del puerto de Navacerrada, los cuales se han dedicado durante las últimas décadas a cartografiar sobre el terreno los aludes observados en la zona, contando en ocasiones con la ayuda de agentes forestales y medioambientales, vigilantes del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama y aficionados a los deportes de montaña. En la figura 2 se ha representado en color rojo la extensión de los aludes registrados en la zona de estudio.

La mayor parte de los aludes observados se concentra en el macizo de Peñalara, en su vertiente sureste. Esta es la zona de mayor altitud de la sierra de Guadarrama, alcanzándose 2428 m en el pico de Peñalara. Es también el área de la sierra donde las huellas del glaciario son más evidentes, existiendo numerosas hoyas, circos y lagunas de origen glaciar, y donde los aludes son más frecuentes. También se trata de la zona más transitada por montañeros, esquiadores fuera de pista y visitantes en general, llegando a estar masificada en la temporada de nieve, por lo que difícilmente un alud pasará desapercibido en esta zona, al menos en el área comprendida entre el puerto de los Cotos y la cima de Peñalara, que comprende las hoyas de Dos Hermanas y el circo de la Laguna Grande de Peñalara. Esta es la zona mejor monitorizada de la sierra de Guadarrama y en la que se ha observado, con diferencia, un mayor número de aludes: se tiene constancia de la ocurrencia de 104 aludes desde 2009 en la zona, lo que supone el 50 % de todos los aludes observados en la sierra de Guadarrama. Por ello, puede considerarse el registro de aludes en esta zona de la vertiente sureste del macizo de Peñalara como exhaustivo, y es el que se ha utilizado en el presente estudio para calibrar el modelo GPP.

Otras áreas de la sierra de Guadarrama, especialmente las zonas que se encuentran alejadas de los principales puertos de montaña, son mucho menos transitadas, y con toda probabilidad se habrán producido aludes de los que no se tiene constancia, por lo que el registro histórico debe considerarse incompleto en estas zonas.

Siguiendo el criterio de Bühler et al. (2013) para clasificar el tamaño de los aludes en función de su área, de los 208 aludes observados en el periodo considerado únicamente 6 (el 2,9 %) son aludes de tamaño grande ( $> 100\ 000\ m^2$ ), 5 (el 2,4 %) son de tamaño mediano (entre  $50\ 000$  y  $100\ 000\ m^2$ ), y 199 (el 95,7 %) son de tamaño pequeño ( $< 50\ 000\ m^2$ ).

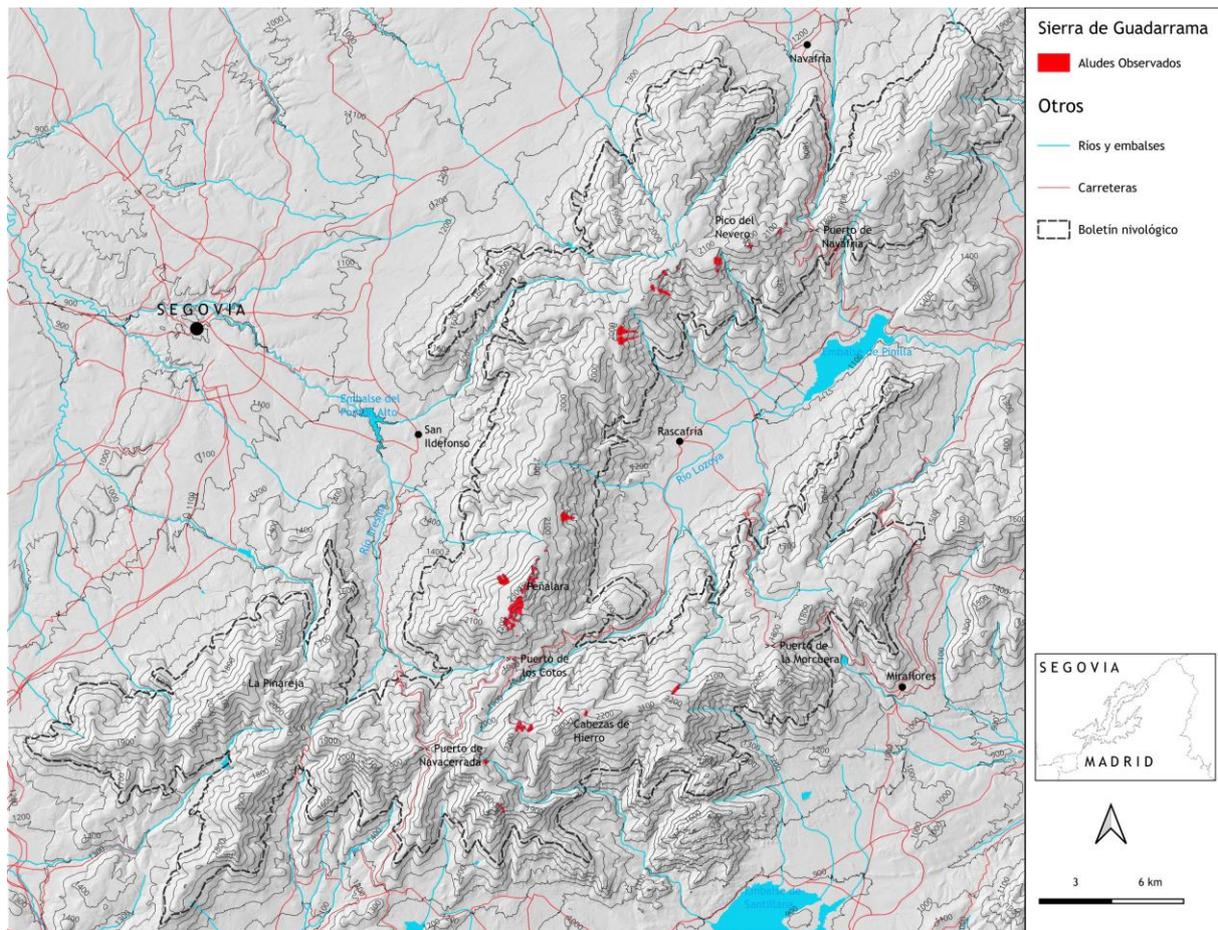


Figura 2. Extensión de los aludes observados en la zona de estudio desde 2009.

## 2.4 Determinación de las zonas potenciales de salida de aludes

Como se ha comentado anteriormente, para ejecutar el modelo GPP es necesario disponer previamente de una capa ráster con las áreas potenciales de salida de aludes, la cual se utilizará en el modelo como zonas de salida de aludes. La determinación de las zonas potenciales de salida de aludes puede realizarse de diversas maneras, si bien el método más fiable consiste en usar, cuando existen, los registros históricos de avalanchas en la zona, conjuntamente con estudios de campo realizados por expertos en avalanchas (Bühler et al., 2013).

El parámetro topográfico más importante en la generación de aludes es la pendiente del terreno. En principio, se puede iniciar un alud en cualquier zona donde la pendiente esté comprendida entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$ , salvo que exista un bosque denso que evite su inicio (Maggioni et al., 2002). Por debajo de  $30^\circ$  la fuerza gravitacional es generalmente demasiado débil para iniciar una avalancha, mientras que por encima de  $60^\circ$  las avalanchas son muy frecuentes pero de muy pequeñas dimensiones, ya que la pendiente es demasiado grande como para que se acumule una cantidad significativa de nieve.

En el presente estudio, se han considerado como áreas potenciales de salida de aludes aquellas zonas cuya pendiente del terreno está comprendida entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$  y que no se encuentren en una zona de bosque denso. Estos criterios coinciden con los utilizados por Maggioni et al. (2002) para la caracterización automática de las zonas potenciales de salida de aludes en la región de Davos, Suiza. Se ha añadido, además, la condición de que la altitud sea superior a 1800 m, ya que

en el registro de aludes de la zona de estudio no consta que se haya iniciado ningún alud por debajo de esta cota. De esta manera, se evita clasificar como zonas potenciales de salida de aludes áreas de media y baja altitud en las que la acumulación de nieve no suele ser significativa y perdura habitualmente poco tiempo tras una nevada.

Por tanto, se han considerado zonas potenciales de salida de aludes aquellas áreas que cumplen simultáneamente los criterios siguientes:

- 1) Pendiente del terreno comprendida entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$
- 2) No presencia de bosque denso
- 3) Altitud superior a 1800 m

Estas condiciones se han aplicado utilizando el modelo digital de elevaciones MDT05 del Instituto Geográfico Nacional, con un paso de malla de 5 metros (IGN y CNIG, 2008-2015). Se han considerado como zonas de bosque denso aquellas con una cubierta de arbolado igual o superior al 70 %, siguiendo el criterio utilizado en estudios realizados para la determinación de parámetros forestales para la simulación de avalanchas de nieve en la región de Davos (Brožová et al., 2020). Para la determinación de las zonas de bosque denso se utilizó el Mapa Forestal de España MFE25 a escala 1: 25 000 (MITECO 2015-2022), mientras que los cálculos se realizaron utilizando el sistema de información geográfica libre SAGA GIS (Conrad et al., 2015).

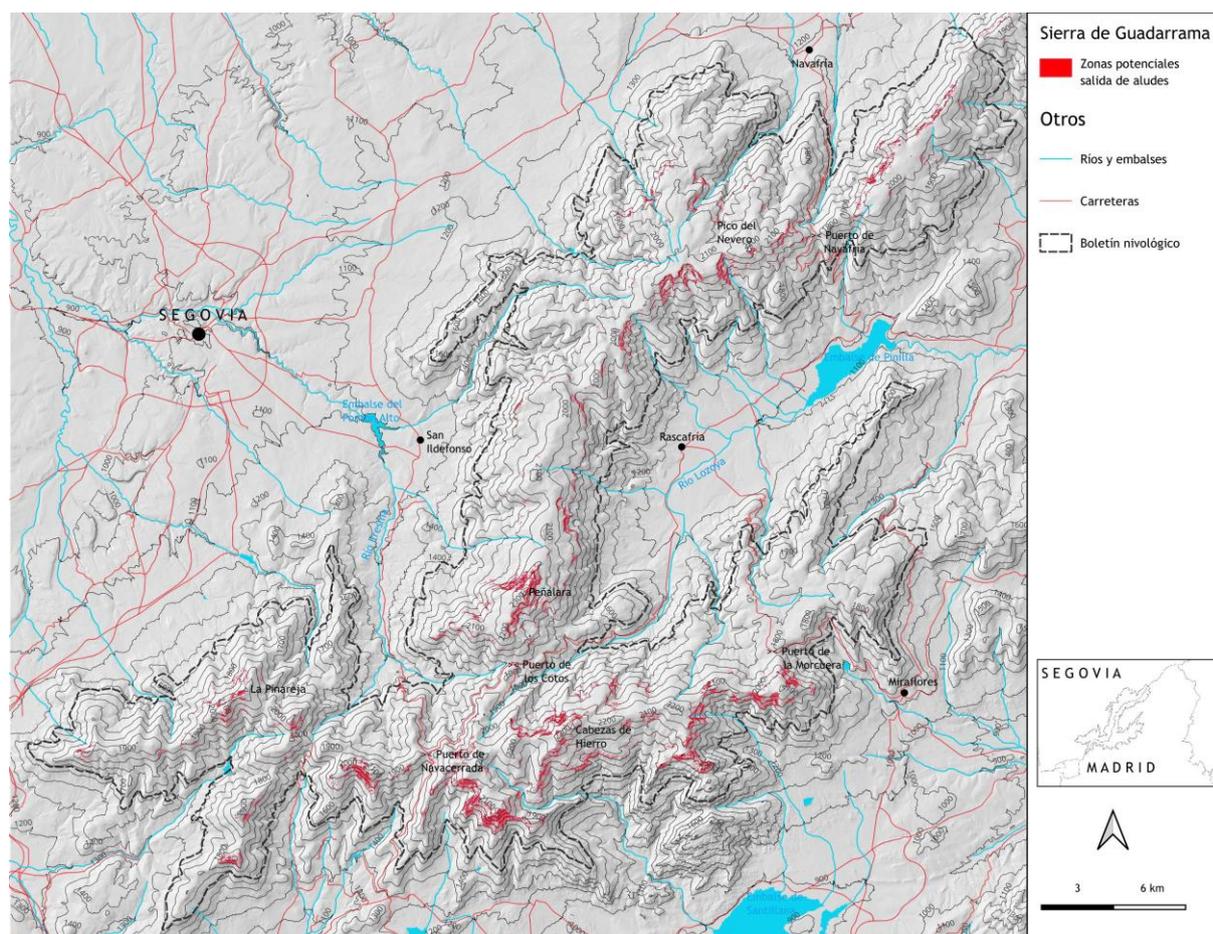


Figura 3. Zonas potenciales de salida de aludes en la zona de estudio.

### 3 Resultados

#### 3.1 Zonas potenciales de salida de aludes

En la figura 3 se han representado las zonas potenciales de salida de aludes obtenidas siguiendo la metodología explicada en el apartado anterior.

Para validar las zonas potenciales de salida de aludes obtenidas se dispone del registro histórico con el cartografiado aproximado de cada alud observado. Este incluye tanto la zona de salida como el recorrido de los aludes y la zona de deposición, pero no es posible delimitar en cada uno de ellos la zona exacta de salida del alud. Un criterio que se utiliza habitualmente en estos casos consiste en considerar que el tercio superior del polígono de cada alud representa aproximadamente la zona de salida del alud (Bühler et al., 2013). Siguiendo este criterio, se han comparado las zonas potenciales de salida con las zonas estimadas de salida de los aludes observados (figura 4), resultando que de los 208 aludes registrados desde 2009, en 203 (el 97,6 %) la zona de salida observada interseca con las zonas potenciales de salida de aludes, y solo en 5 (el 2,4 %) no existe intersección entre ambas zonas. En 22 aludes (el 10,6 %) la zona de salida observada está cubierta en menos de un 25 % de su superficie por las zonas potenciales de salida; en 71 aludes (el 34,1 %) la zona de salida observada está cubierta en menos de un 50 % por las zonas potenciales de salida; en 137 aludes (el 65,9 %) la zona de salida observada está cubierta en al menos el 50 % por las zonas potenciales de salida, y en 69 (el 33,2 %) al menos el 75 % de la zona de salida observada está cubierta por las zonas potenciales de salida. Teniendo en cuenta las limitaciones que ofrece el registro histórico de aludes debido a las imprecisiones inherentes al cartografiado de los aludes, y la limitación añadida de suponer que el tercio superior del recorrido de cada alud se corresponde con la zona de salida, los resultados obtenidos pueden considerarse como buenos, y resultan comparables a los obtenidos por Bühler et al. (2013) en la región de Davos para aludes de tamaño pequeño ( $< 50\,000\text{ m}^2$ ), que como se vio anteriormente constituyen más del 95 % de los aludes registrados en la sierra de Guadarrama.

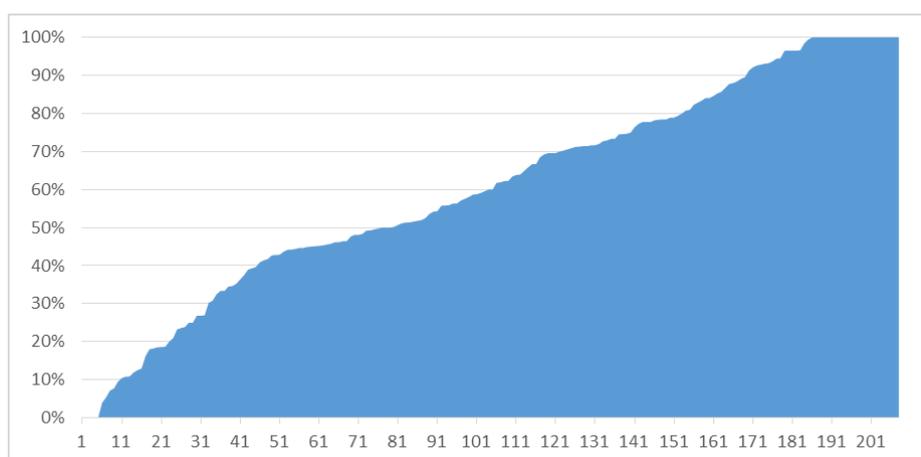


Figura 4. Porcentaje de las zonas de salida de los aludes observados cubiertas por las zonas potenciales de salida de aludes.

#### 3.2 Zonas potenciales de recorrido de aludes

Siguiendo la metodología descrita, se aplicó a continuación el modelo GPP utilizando como entradas el modelo digital de elevaciones MDT05 y la capa de zonas potenciales de salida de

aludes, escogiendo el modelo *random walk* para el recorrido de los aludes y el modelo PCM para la distancia de deposición, con 20 iteraciones. Para tener en cuenta el efecto que tiene el arbolado en la retención de las avalanchas de nieve una vez que se han iniciado, se aplicó en el modelo PCM un coeficiente de fricción al deslizamiento  $\mu$  variable, con un valor de 0,3 para las zonas con 0 % de arbolado y de 2,0 para un 70 % de arbolado o superior (bosque denso), teniendo en cuenta los valores sugeridos por Wichmann (2013).

El resultado se puede observar en la figura 5, en la que se ha representado el número de celdas de nieve que caerían en cada celda si se produjera un alud simultáneamente en todas las zonas potenciales de salida de aludes, siendo el resultado el promedio de las distintas iteraciones realizadas. Se obtiene así un mapa de las zonas propensas a la ocurrencia de aludes en la sierra de Guadarrama, en el que las zonas marcadas con un color rojo más intenso indican una mayor probabilidad de que se puedan ver afectadas por un alud, y de que este sea de un tamaño mayor en caso de producirse.

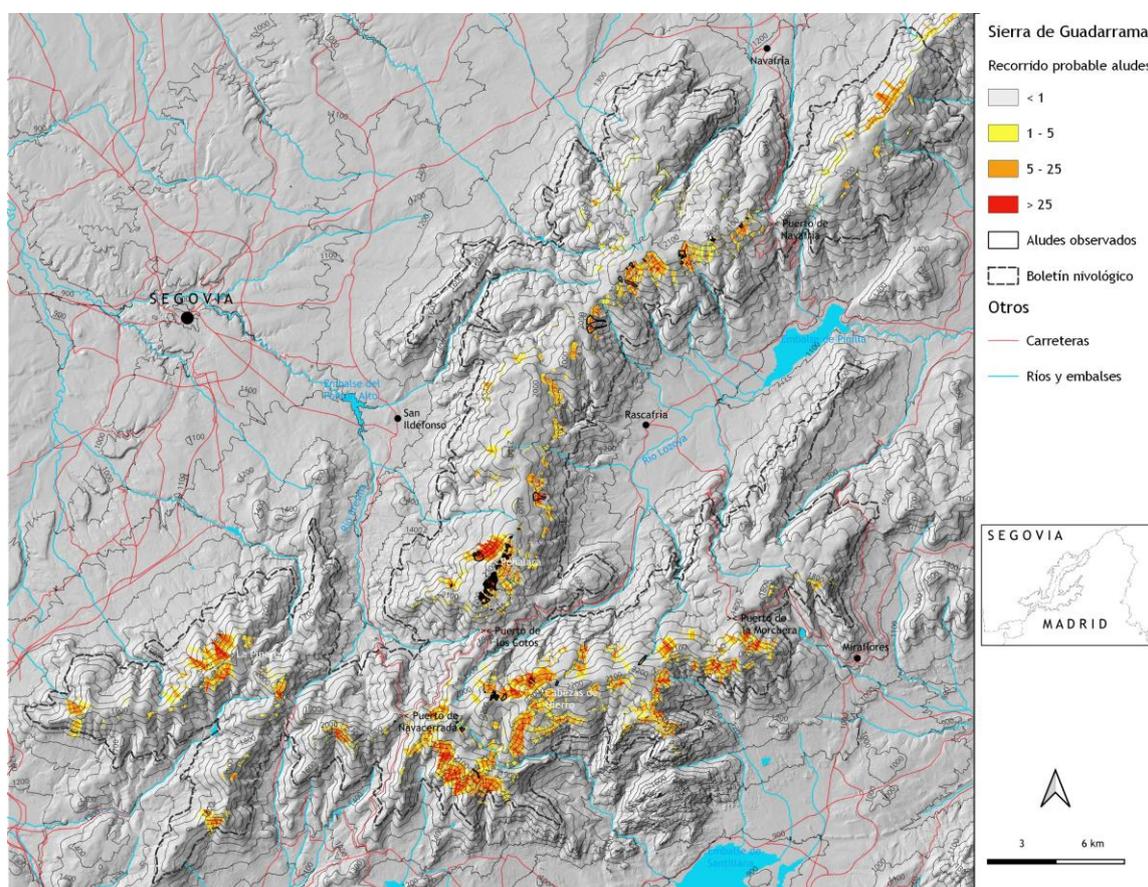


Figura 5. Zonas potenciales de recorrido de aludes en la zona de estudio según el modelo GPP.

Conviene tener presente al analizar los resultados que las zonas potenciales de recorrido de aludes son zonas en las que las características geográficas, concretamente la pendiente del terreno, la existencia o no de bosque denso y la altitud, son propicias para la ocurrencia de aludes. Pero para que se desencadene un alud es necesario que exista, además, una acumulación de nieve suficiente. Analizando el mapa resultante, se observa que las zonas del macizo de Peñalara en las que son muy frecuentes los aludes quedan asimismo muy bien caracterizadas por el resultado del modelo. Pero se observan también otras zonas con características geográficas muy favorables a los aludes en las que, habitualmente, la acumulación de nieve es mucho menor, como son la vertiente sur de La Maliciosa, la cara sur de Siete Picos, la cara sur de La Peñota o las zonas altas

de La Pedriza, en las que los aludes son poco frecuentes o, incluso, no se tiene constancia de su ocurrencia. A pesar de ello, resulta conveniente catalogar esas zonas como potencialmente peligrosas en los casos en que se produzca una acumulación suficiente de nieve en ellas.

Para validar los resultados, se compararon las zonas potenciales de recorrido de aludes con el registro histórico de aludes observados en la zona de estudio (figura 6). De los 208 aludes registrados, en 116 (el 55,8 %) el 100 % del recorrido del alud queda dentro de las zonas potenciales de recorrido de aludes. En 197 aludes (el 94,7 %) el 75 % o más del recorrido del alud está dentro de las zonas potenciales de recorrido de aludes, y en 203 aludes (el 97,6 %) al menos el 50 % del recorrido observado cae dentro de dichas zonas. Tan solo en 4 aludes (el 1,9 %) menos del 25 % del recorrido está dentro de las zonas potenciales de recorrido de aludes, mientras que en solo en dos de ellos (el 1,0 % de los aludes observados) queda completamente fuera, debido probablemente a imprecisiones en el trazado de dichos aludes, que son además de muy pequeño tamaño. Estos resultados ponen en evidencia un óptimo comportamiento del modelo aplicado para predecir de forma satisfactoria las zonas en las que se pueden producir aludes en la sierra de Guadarrama.

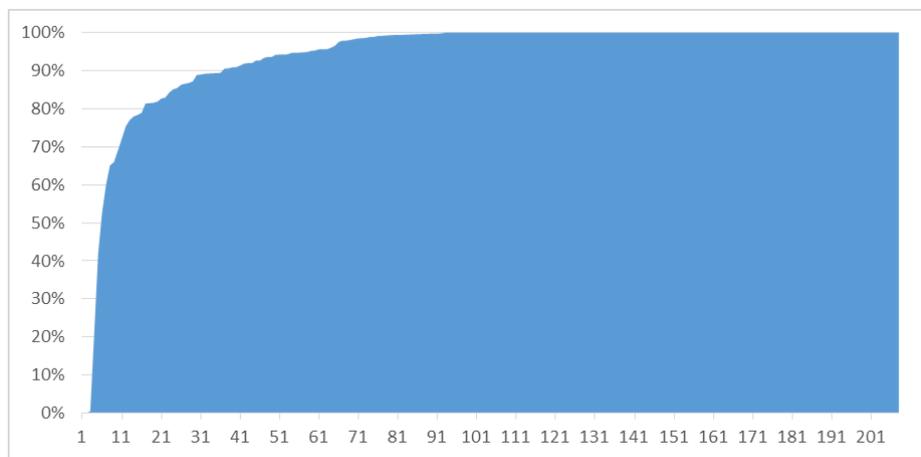
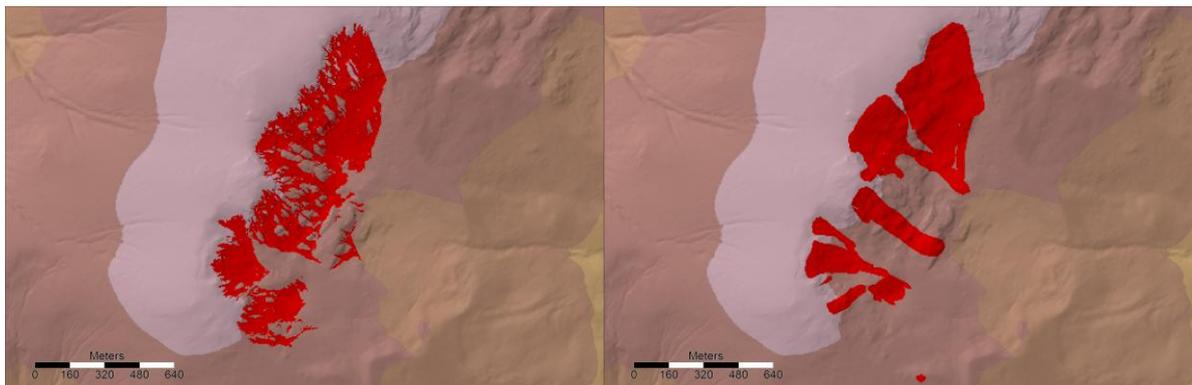


Figura 6. Porcentaje del recorrido de los aludes observados cubiertos por las zonas potenciales de recorrido de aludes estimadas por el modelo.

Se realizó, además, una validación inversa para comprobar que el modelo no sobrestima en exceso las zonas potenciales de aludes. Dado que, como se comentó anteriormente, el registro histórico de aludes solo puede considerarse exhaustivo en la zona de la vertiente sureste del macizo de Peñalara comprendida entre el puerto de los Cotos y el circo de la Laguna Grande de Peñalara, se escogió esta zona para comparar las áreas en las que se han observado aludes con las zonas potenciales de recorrido de aludes proporcionadas por el modelo. Para evitar tener en cuenta avalanchas de nieve demasiado pequeñas previstas por el modelo, que corresponderían a pequeñas coladas que no alcanzarían probablemente la categoría de aludes pequeños, se consideraron únicamente las zonas previstas por el modelo en las que caería nieve procedente de más de 5 celdas (125 m<sup>2</sup>) en el caso de producirse un alud. Este número de celdas se escogió teniendo en cuenta que el alud más pequeño del registro histórico tiene una superficie de 145 m<sup>2</sup>. Realizando la comparación (figura 7), se observó que el 63,5 % de la superficie correspondiente a las zonas potenciales de recorrido de aludes del modelo coincide con áreas en las que hay registro histórico de aludes, mientras que solo en el 36,5 % de las zonas potenciales de aludes no hay por el momento constancia de la ocurrencia de aludes. Como se observa en la figura 7, los resultados del modelo se ajustan en gran medida a los aludes observados, sin que se aprecie aparentemente una sobreestimación de las zonas potenciales de aludes. El resultado puede considerarse, por

tanto, como satisfactorio, teniendo en cuenta además las limitaciones inherentes al registro y al cartografiado de los aludes históricos comentadas anteriormente.



*Figura 7. Comparación entre las zonas potenciales de recorrido de aludes (izquierda) y los aludes históricos observados (derecha) en la vertiente sureste del macizo de Peñalara comprendida entre el puerto de los Cotos y el circo de la Laguna Grande de Peñalara.*

## 4 Conclusiones

Del resultado de la validación efectuada se desprende que el modelo aplicado, a pesar de ser relativamente sencillo, ya que utiliza únicamente como parámetros geográficos la pendiente del terreno, la altitud y la existencia de bosques densos, proporciona un comportamiento satisfactorio a la hora de predecir las zonas propensas a la ocurrencia de aludes en la sierra de Guadarrama.

El modelo se ha calibrado y validado gracias a la disponibilidad de un registro histórico de aludes en la zona de estudio. Los resultados permiten definir de una manera relativamente objetiva y precisa las zonas de la sierra de Guadarrama propensas a la ocurrencia de avalanchas de nieve, incluso en las zonas remotas, menos transitadas, en las que no se dispone de datos históricos de aludes o son incompletos.

Esta información puede resultar de interés tanto para estudios académicos y científicos relacionados con la ocurrencia de aludes como para la gestión y la seguridad de los recursos de montaña en la zona estudiada. Los resultados de este trabajo se han utilizado para realizar la clasificación ATES v.2 de la sierra de Guadarrama incluida en la publicación *Mapa de clasificación del terreno por exposición al peligro de aludes (ATES) de la sierra de Guadarrama* (Pantoja et al., 2025).

## 5 Referencias

- [1] Chazarra, A., Fernández-Cañadas, J.A., Sanz, G. (2018). Mapas de espesor de nieve en la sierra de Guadarrama obtenidos mediante técnicas SIG. Asociación Meteorológica Española. Agencia Estatal de Meteorología. <https://dx.doi.org/10.30859/amejrCn35p265>
- [2] Brožová, N., Fisher, J.-T. Bühler, Y., Bartelt, P., and Bebi, P. (2020): Determining forest parameters for avalanche simulation using remote sensing data, *Cold Regions Science and Technology*, Volume 172, 102976, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102976>
- [3] Bühler, Y., Kumar, S., Veitinger, J., Christen, M., Stoffel, A., and Snehmani (2013): Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1321–1335, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1321-2013>
- [4] Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., . . . Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007. doi:10.5194/gmd-8-1991-2015
- [5] Fernández-Cañadas, J.A. (2014). Los aludes de nieve en el macizo de Peñalara. Nota técnica 14. Agencia Estatal de Meteorología. <https://dx.doi.org/10.31978/281-14-005-3>
- [6] Gamma, Patrick. (2000). dfwalk-Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. *Geographica Bernensia*. G66.
- [7] Instituto Geográfico Nacional (IGN) y Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) (2009-2015). Modelo Digital del Terreno de 1ª cobertura (2008-2015) con paso de malla de 5 metros (MDT05) de España. <https://www.idee.es/csw-inspire-idee/srv/spa/catalog.search?#/metadata/spainMDT05>
- [8] Maggioni, M., Gruber, U. and Stoffel, A. (2002). Definition and characterisation of potential avalanche release. *Cold Regions Science and Technology* · January 2002.
- [9] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2015-2022). Mapa Forestal de España de máxima actualidad. <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/mfe.html>
- [10] Muñoz, J. y Sanz, C. (1995). *Guía física de España: Las Montañas*. Alianza Editorial.
- [11] Müller, K., Techel, F., Mitterer, C., Feistl, T., Sofia, S., Roux, N., Palmgren, P., Bellido, G.M., Bertranda, L. (2023). The EAWS Matrix, a look-up table for regional avalanche danger level assessment, and its underlying concept. *Proceedings, International Snow Science Workshop, Bend, Oregon, 2023*.
- [12] O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M. (1984). The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 328-344. [http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- [13] Pantoja, A., Pantoja, L.A., Chazarra, A., Fernández-Cañadas, J.A. (2025). Mapa de clasificación del terreno por exposición al peligro de aludes de la sierra de Guadarrama. Nota técnica N° 44. Agencia Estatal de Meteorología.
- [14] Perla R, Cheng TT, McClung DM. A Two-Parameter Model of Snow-Avalanche Motion. *Journal of Glaciology*. 1980; 26(94):197-207. doi: 10.3189/S002214300001073X
- [15] Statham, G., McMahon, B., Tomm, I. (2006): The Avalanche Terrain Exposure Scale. *International Snow Science Workshop, Telluride, USA*, 491-497.

- [16] Statham, G. and Campbell, C. (2023): The Avalanche Terrain Exposure Scale v.2, in: Proceedings International Snow Science Workshop, Bend, OR, USA, 9–13 October 2023, <https://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/2939>
- [17] Wichmann, V. (2017). The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) – a GIS-based simulation framework for gravitational processes, *Geosci. Model Dev.*, 10, 3309–3327 <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3309-2017>