

# METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTOS EN EL PARQUE NACIONAL DE SIERRA NEVADA MEDIANTE SIG

JOSÉ MIGUEL AZAÑÓN<sup>1,2</sup>, JOSÉ VICENTE PÉREZ-PEÑA<sup>1</sup>, JESÚS YESARES<sup>1</sup>, MARTÍN  
JESÚS RODRÍGUEZ-PECES<sup>5</sup>, FRANCISCO JOSÉ ROLDÁN<sup>3</sup>,  
ROSA MARÍA MATEOS<sup>3</sup>, JOSÉ RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ<sup>2</sup>, JORGE DELGADO<sup>4</sup>,  
JOSÉ LUIS PÉREZ GARCÍA<sup>4</sup>, ANTONIO AZOR<sup>1</sup>, GUILLERMO BOOTH-REA<sup>1,2</sup>  
Y JOSÉ MIGUEL MARTÍNEZ-MARTÍNEZ<sup>2</sup>

## RESUMEN

En este trabajo se ha evaluado la susceptibilidad frente a movimientos de ladera para el área ocupada por el Parque Nacional de Sierra Nevada. Para realizar el análisis de la susceptibilidad se han tenido en cuenta numerosos factores condicionantes, los cuales se han dividido entre variables obtenidas directamente del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y variables externas al mismo. En este trabajo se analizan variables que no se habían tenido en cuenta en estudios previos de susceptibilidad en la región, tales como: el índice de vegetación normalizado (NDVI), la distancia a estructuras tectónicas activas (pliegues y fallas), ciclos de fusión y duración de la nieve y el umbral de escorrentía superficial (P0). Se han diferenciado tres tipologías de movimientos de ladera por separado; deslizamientos, flujos, y desprendimientos. Para cada tipología de movimientos se ha realizado un inventariado de movimientos mediante fotointerpretación y posterior validación en campo. El método utilizado para evaluar la susceptibilidad se basa en un análisis estadístico multivariante, con el fin de obtener las variables que expliquen mejor las varianzas de las distribuciones para cada tipología de movimientos. Para ello se ha realizado un análisis de componentes principales (ACP) para cada tipología de movimiento. Posteriormente, mediante un análisis discriminante se ha evaluado el peso de las distintas variables para elaborar mapas de zonificación de la susceptibilidad del terreno frente a cada uno de los tipos de movimientos considerados. El mapa de susceptibilidad total resultante se ha elaborado en base a los tres mapas de susceptibilidad considerados.

**Palabras clave:** susceptibilidad frente a inestabilidades de ladera, Parque Nacional de Sierra Nevada, SIG, Estadística multivariante.

---

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain. [jazanon@ugr.es](mailto:jazanon@ugr.es)

<sup>2</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (UGR-CSIC).

<sup>3</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, Jaén, Spain.

<sup>5</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain.

## SUMMARY

In this work we evaluated the landslide susceptibility of the Sierra Nevada National Park area. In order to analyze the susceptibility, we took into account many conditional factors, which have been divided in those derived from the Digital Elevation Model (DEM), and factors external to it. This work analyses many variables that had not been taken into account in previous studies such as; normalized vegetation index (NDVI), distance to active tectonic structures (folds and faults), snow melting cycles, snow duration, and runoff coefficient (P0). We have differentiated three types of slope instabilities; slides, flows, and rock falls. For each type we carried out a inventory using aerial photographs and field work. To evaluate the susceptibility, we used a multivariate statistics approach, obtaining those factors that better explain the variance of the landslide distributions. The factors for each type of slope movement have been selected through a Principal Component Analysis (PCA). In order to produce the different susceptibility maps, we have carried out a discriminate analysis to weight the different factors for each type of movement. The three resulting susceptibility maps have been combined in order to obtain a general susceptibility map for slope movements in the Sierra Nevada National Park area.

**Key word:** landslide susceptibility, Sierra Nevada National Park, GIS, multivariate statistic.

## INTRODUCCIÓN

Los movimientos de ladera o deslizamientos constituyen un riesgo geológico (AYALA-CARCEDO & ANDREU 1987) de origen natural o inducido que deben tenerse en cuenta en la planificación del territorio (SANTACANA 2001). Estos procesos naturales tienen, por lo general, una percepción menor en comparación con otros fenómenos tales como inundaciones o terremotos, ya que producen un menor número de víctimas mortales. Sin embargo, las pérdidas materiales producidas por este tipo de procesos pueden alcanzar costes elevados, tanto directos como indirectos. Los costes directos serían aquellos derivados del daño material causado directamente por el movimiento de ladera, como daños en infraestructuras (vías de comunicación, edificaciones, etc.). Los costes indirectos pueden ser muy variados y engloban muchos aspectos tales como: pérdida de productividad agrícola debido al daño en el suelo de cultivo, reducción de ingresos del sector turístico ocasionados por daño en infraestructuras o vías de comunicación, reducción del valor del terreno, efectos en la calidad de las aguas superficiales, posibilidad de inundaciones por represamientos (KEITH-TURNER & SCHUSTER 1996). Por todos estos motivos, es fundamental una evaluación eficaz de la

susceptibilidad del terreno frente a inestabilidades de ladera. Con una prevención adecuada es posible la reducción de los costes tanto directos como indirectos causados por estos procesos.

Para elaborar un mapa de susceptibilidad frente a inestabilidades de ladera en general, es necesario tener en cuenta un gran número de factores del terreno. Este tipo de mapas zonifican el terreno en función de su potencial riesgo frente a estos procesos. La forma más eficaz para realizar esta zonificación es hacer un análisis multivariante de los diferentes factores condicionantes. Sin embargo, los factores condicionantes, que influyen en las inestabilidades de laderas, no lo hacen de la misma forma en todas las áreas, por lo que no es posible aplicar una metodología estándar para la realización de este tipo de análisis de susceptibilidad. El análisis sobre el terreno permite constatar que un factor que tenga una gran influencia en un área concreta, puede tener mucha menos en otro área diferente, aunque se trate de la misma tipología de movimiento. Por este motivo es necesario realizar análisis de este tipo para zonas de estudio concretas.

Teniendo en cuenta la cantidad de factores condicionantes involucrados en la inestabilidad de laderas, la praxis de la zonificación de este tipo

de riesgo requiere (SOETERS & VAN WESTEN 1996):

- Un inventario detallado de los procesos de inestabilidad.
- El estudio de estos procesos en relación con el medio en el que se producen.
- El análisis de los factores condicionantes y desencadenantes.
- Una representación de la distribución espacial de estos factores.

En este trabajo, se ha analizado la susceptibilidad frente a deslizamientos en el Parque Nacional de Sierra Nevada. Este tipo de análisis es fundamental para una mejor gestión y organización del Parque, ya que delimita aquellas zonas más susceptibles y permite adecuar y actualizar medidas de prevención tales como mejor diseño de vías de comunicación, ubicación óptima de instalaciones, reconocimiento de zonas altamente susceptibles para adoptar medidas de prevención o restringir el acceso a las mismas, etcétera.

Para este fin se ha desarrollado una metodología propia basada en el análisis de parámetros mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y una aplicación que permite el análisis de susceptibilidad frente a deslizamientos (GISLAN).

## METODOLOGÍA

Los análisis de susceptibilidad frente a deslizamientos se pueden enfocar de diversas maneras, dependiendo de la escala de detalle que se quiera emplear en el estudio o del tipo de aproximación que se quiera llevar a cabo. Fundamentalmente hay dos tipos de aproximaciones (COROMINAS 1992; IRIGARAY-FERNÁNDEZ & CHACÓN-MONTERO 2002):

- *Métodos no deterministas*, que estudian la presencia de movimientos de ladera en amplias regiones, utilizando observaciones geológicas y geomorfológicas y modelos basados en el

tratamiento estadístico de los parámetros de las laderas. Existen diversas técnicas no deterministas que siguen la idea del principio del actualismo. Según dicho principio, los procesos de inestabilidad que se han producido en el pasado y, por tanto, los que se producirán en el futuro, han sido y serán semejantes a los actuales. Por tanto, el estudio de los fenómenos de inestabilidad producidos en el pasado va a permitir, siempre que se conozcan las condiciones en que se originaron, hacer predicciones de futuro. Este tipo de técnicas son muy útiles para amplias regiones.

- *Métodos deterministas*, que predicen el comportamiento de las laderas o taludes mediante modelos de cálculo de estabilidad. Estos métodos están basados en leyes físicas y mecánicas universales que permiten hacer una predicción de tipo espacial y temporal. Son aplicables a taludes individuales o a laderas de reducidas dimensiones. Presentan el problema de ser costosos y no muy prácticos en regiones amplias.

La aparición y evolución de los SIG ha supuesto un importante impulso al desarrollo de las técnicas de análisis de susceptibilidad frente a inestabilidades de ladera dada la importancia que tiene el hecho de poder expresar de manera gráfica una serie de rasgos del terreno cartografiables y, a la vez, que estos datos expresados de manera gráfica estén referenciados geográficamente.

Los principales métodos y técnicas utilizadas para la zonificación de la susceptibilidad frente a los movimientos de ladera mediante SIG se pueden englobar en: a) métodos basados en el análisis de distribución de los movimientos de ladera, b) en el análisis de actividad, c) en el análisis geomorfológico, d) en el análisis cualitativo, e) en análisis estadísticos bivariantes o multivariantes, f) en modelos deterministas, y métodos basados en modelos de densidad de movimientos.

En este estudio se ha optado por un modelo basado en un análisis estadístico multivariante (Figura 1). Este tipo de métodos analiza básicamente

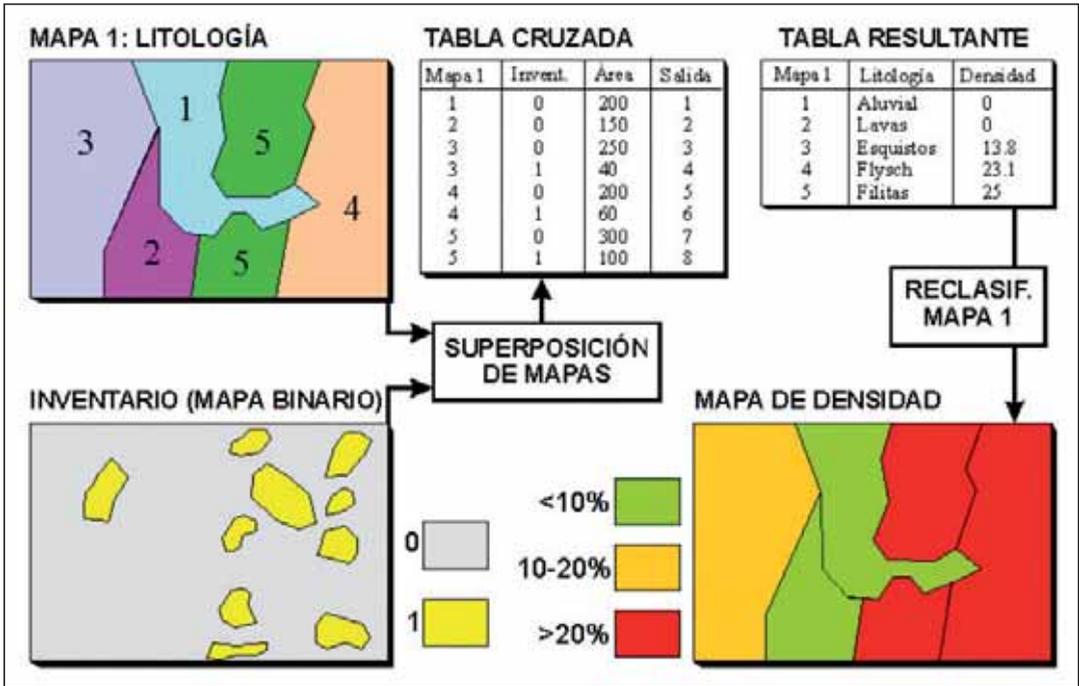


Figura 1. Representación esquemática del uso de los SIG para el análisis estadístico multivariante.

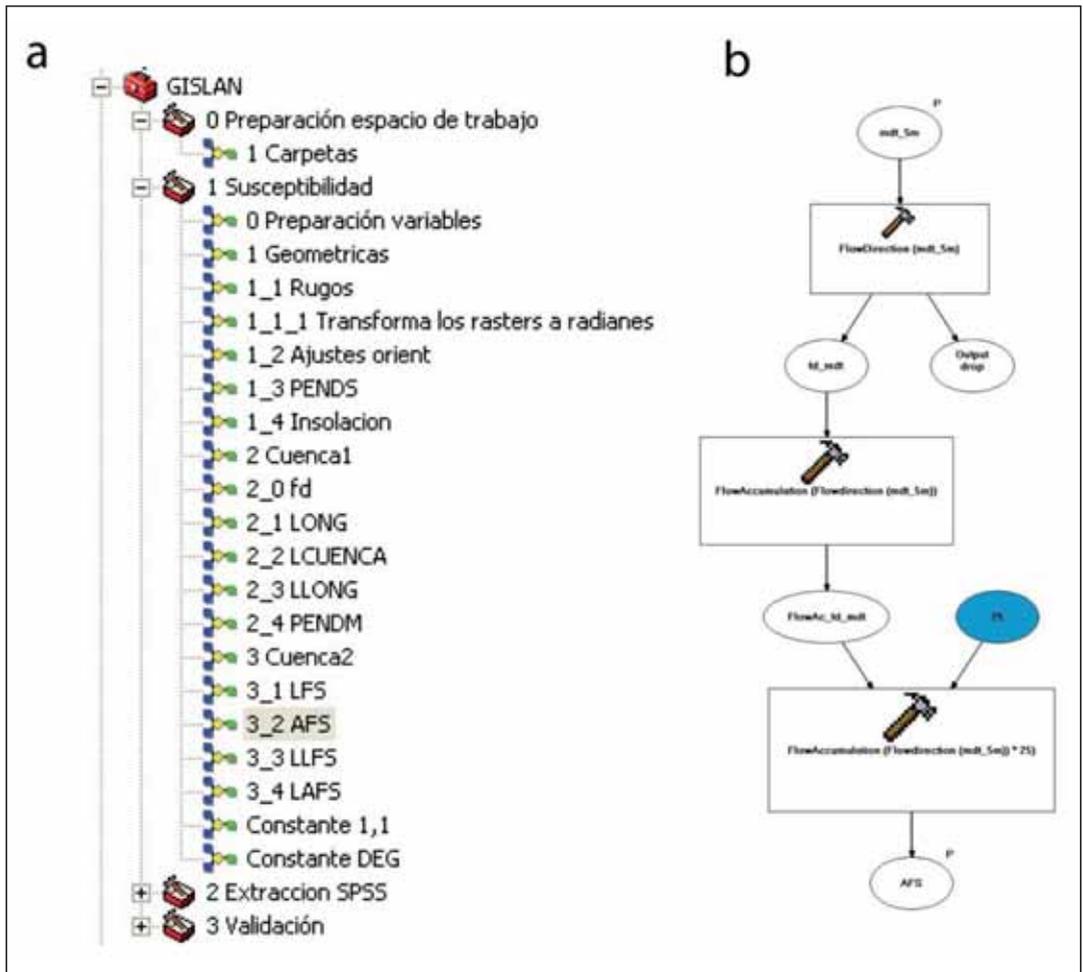
Figure 1. Schematic representation of the use of GIS for multivariate statistical analysis.

los diferentes factores que determinan la generación de deslizamientos proporcionando la contribución relativa de cada uno de ellos a la susceptibilidad total en una determinada unidad del terreno (CARRARA 1983; SANTACANA *et al.* 2003). Existen dos tipos:

- a) El análisis estadístico de datos puntuales a partir de la comprobación de una lista de factores determinados.
- b) El análisis sobre unidades del terreno que cubren toda la zona de estudio. En este tipo de análisis, para cada una de las unidades definidas se obtiene una serie de datos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y morfométricos y se analizan mediante técnicas de regresión múltiple o análisis discriminante, con la ayuda de los cuales se obtiene el mapa de susceptibilidad. En este trabajo se ha adoptado esta aproximación que toma como

base el método de análisis creado por (SANTACANA 2001), y que ha sido aplicado de forma muy satisfactoria en diversas áreas de los Pirineos.

Para este trabajo se ha utilizado la utilidad GISLAN (YESARES 2008). Dicho sistema consiste en un conjunto de módulos programados e integrados dentro del SIG ArcGIS 9.X. Mediante los módulos de GISLAN (Figura 2) se generarán, a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la zona de estudio, diversos mapas intermedios y finales que representarán aquellas variables que intervienen en la formación de inestabilidades de ladera. Este método realiza algunas modificaciones sobre propuestas anteriores (SANTACANA 2001), así como la adaptación de los algoritmos de ArcInfo a ArcGIS, puesto que ésta es la plataforma que se utiliza en la actualidad por la mayoría de los organismos públicos y empresas.



**Figura 2.** a) Conjunto de herramientas que componen la utilidad GISLAN para la determinación de la susceptibilidad frente a movimientos de ladera. b) Diagrama en «Model Builder» para una de las herramientas de GISLAN (variable afs; área ocupada por la formación superficial aguas arriba).

**Figure 2.** a) Toolbox which comprises the GISLAN application to evaluate the susceptibility to slope movements. b) Flowchart in Model Builder of one of the GISLAN tools (afs variable; area occupied by the upstream superficial formation).

Con los mapas generados por este software se han realizado diversos análisis mediante un paquete estadístico externo (SPSS 12) con objeto de obtener finalmente una función discriminante con la que decidir qué variables intervienen a favor o en contra de la formación de los distintos movimientos de ladera considerados. Las funciones discriminantes han ayudado a determinar el peso de cada una de estas varia-

bles en cada caso. Finalmente este mapa se puede validar indirectamente mediante el cálculo del índice de densidad relativa (BAEZA-ADELL 1994), que expresa el grado de ajuste de la función para predecir roturas (SANTACANA 2001). También se deberá realizar una comprobación del mapa resultante por comparación con las observaciones realizadas en el campo.

## Preparación y toma de datos

Las variables a tener en cuenta en este análisis se han dividido en dos: aquellas relacionadas con el modelo digital del terreno (MDE) y las que controlan parámetros externos al modelo. Como un gran número de las variables van a ser obtenidas automáticamente a partir del MDE, cabe destacar, que cuanto mayor sea la precisión del mismo, mayor será el ajuste del modelo de susceptibilidad a la realidad. La Tabla 1 resume las variables utilizadas en este estudio (tanto externas como derivadas del MDE), así como una breve descripción de las mismas.

## Inventario de las inestabilidades de ladera

Se han inventariado tres tipologías de inestabilidades de ladera para este estudio: flujos, desprendimientos y deslizamientos. Para cada tipología de movimientos se ha realizado un inventario mediante análisis sobre el terreno e interpretación con fotografía aérea (Figuras 3, 4 y 5). Este inventario aparece en el estudio como una variable cualitativa para su inclusión en el análisis de susceptibilidad. Posteriormente se

han digitalizado en ArcGIS los inventarios para cada uno de los tipos de movimientos, los cuales incluyen la zona de rotura, transición y zona de acumulación de la masa movilizada (Figuras 6, 7 y 8).

Cada una de las tres variables ha sido rasterizada para su inclusión en el análisis de susceptibilidad, definiendo la presencia de inestabilidad con valor 1, y el fondo (celdas sin dato de rotura) con valor 0. Estas variables indican la existencia o ausencia de inestabilidades previas, cuya presencia permitirá realizar la predicción. Por ello, estas variables se definen como *variables de agrupación* para el análisis estadístico, estableciendo las relaciones estadísticas con las variables condicionantes (SANTACANA 2001).

## Análisis estadístico

El análisis estadístico se va a realizar sobre una muestra extraída de forma aleatoria de los inventarios de inestabilidades de ladera. Se ha realizado un análisis estadístico para cada uno de los tipos de inestabilidades de ladera conside-

<b>Variables Externas al MDE</b>	
<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
<b>geolog</b>	Geología simplificada de la zona de estudio, obtenida a partir de los mapas MAGNA 1:50,000 (IGME). Esta variable se genera uniendo aquellas litologías correspondientes a la formación superficial entre sí y separándolas de aquellas otras litologías que representen afloramientos de roca.
<b>dist_fallas</b>	Distancia a fallas activas.
<b>dist_pliegues</b>	Distancia a ejes de pliegues activos.
<b>dis_cauces</b>	Distancia a los principales cauces de ríos.
<b>ndvi_jul2010</b>	Índice de vegetación normalizado obtenido a partir de la imagen de satélite LandSat TM correspondiente a Julio del 2010.
<b>precip</b>	Precipitación media.
<b>p0</b>	Umbral de escorrentía. Esta variable tiene en cuenta uso y tipo del suelo, así como la pendiente media del terreno.
<b>snow_cfus</b>	Ciclos de fusión de nieve. Número de veces que la nieve funde por año (año 2010).
<b>snow_cdurac</b>	Duración de la nieve (días) para el año 2010.
<b>tmax</b>	Temperatura media anual máxima.
<b>tmin</b>	Temperatura media anual mínima.

(Continúa)

Variables Derivadas del MDE	
Variable	Descripción
<b>ins</b>	Mapa de insolación. Representa el coeficiente de iluminación o intensidad reflejada de la superficie terrestre.
<b>pla</b>	Mapa de curvatura media del terreno (medida perpendicularmente a la dirección de la pendiente).
<b>perfil</b>	Mapa de curvatura media del terreno (medida paralelamente a la dirección de la pendiente).
<b>curvar</b>	Mapa de curvatura media del terreno.
<b>pend</b>	Pendiente media del terreno.
<b>pends</b>	Pendiente transformada. Se obtiene calculando el seno del producto de la variable <i>pend</i> en radianes multiplicado por 2 (Santacana, 2001).
<b>rugos</b>	Rugosidad del terreno. Representa la variación de la pendiente en un área (3x3 celdas) dada por la desviación del vector normal a la superficie en cada celda. Sus valores oscilan entre 0 (alta rugosidad) y 1 (rugosidad nula) (Felici-simo, 1992; Santacana, 2001).
<b>orient</b>	Orientación de ladera. Representa la dirección de la máxima pendiente.
<b>long</b>	Longitud máxima de la cuenca. Representa la longitud máxima de la cuenca acumulada aguas arriba de una celda medida sobre la superficie del terreno, y no en su proyección horizontal. Esto motiva que la longitud de cada celda se pondere con la pendiente de la misma (Santacana, 2001).
<b>llong</b>	Longitud máxima de la cuenca transformada. Puesto que es posible que la variable muestre una distribución de frecuencias muy diferente a una distribución normal, se hace una transformación para normalizar la muestra. Esto se hace también con otras variables como a <i>cuenca</i> , <i>afs</i> , y <i>lfs</i> . Posteriormente, en el análisis estadístico se estimará si es mejor utilizar la variable original o la transformada.
<b>pendm</b>	Pendiente media de la cuenca. Expresa la pendiente media, aguas arriba de la celda considerada, y viene dada por el valor medio de la pendiente de la cuenca siguiendo el recorrido de las líneas de flujo acumulado.
<b>acuenca</b>	Área acumulada aguas arriba de la cuenca. Se calcula realizando la sumatoria de la superficie de las celdas que vierten a una cuenca determinada (cuenca acumulada). Esta variable está relacionada con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en el terreno. A mayor superficie más agua infiltrada y más posibilidades de producir roturas (Hatano, 1976; Neuland, 1976; Okimura, 1983; Oyagi, 1984). El área de la cuenca ha demostrado ser un parámetro que influye mucho en la aparición de inestabilidades de laderas (Zaruba y Mencl, 1969).
<b>lcuenca</b>	Área acumulada aguas arriba transformada. Al igual que <i>llong</i> , esta variable representa la normalización de la variable <i>acuenca</i> .
<b>lfs</b>	Longitud máxima aguas arriba en zonas con formación superficial. Indica la longitud máxima de la parte de la cuenca que contiene la formación superficial aguas arriba de una celda, medida sobre la superficie del terreno y no sobre su proyección horizontal.
<b>llfs</b>	Normalización de la variable <i>lfs</i> .
<b>afs</b>	Área ocupada por la formación superficial aguas arriba. Se obtiene sumando la superficie de aquellas celdas que contienen formación superficial y que vierten a la celda (superficie de la cuenca acumulada).

**Tabla 1.** Distintas variables consideradas para la evaluación de la susceptibilidad frente a movimientos de ladera. Las variables se han dividido en; variables externas al MDE, y variables derivadas del MDE. El MDE utilizado tiene una resolución de pixel de 5 m.

**Table 1.** Different variables considered for the susceptibility assessment of slope instabilities. The variables were divided in external variables to the DEM and derived variables from the DEM. The DEM has a pixel resolution of 5 m.



**Figura 3.** Ejemplo de campo de un deslizamiento rotacional en el valle del río Lanjarón.

**Figure 3.** Field example of a rotational slide in the valley of the Lanjarón River.



**Figura 4.** Ejemplo de campo de un flujo en el paraje de Siete Lagunas.

**Figure 4.** Field example of a flow on the site of Siete Lagunas.



Figura 5. Ejemplo de campo de un desprendimiento rocoso cerca del pico del Veleta.

Figure 5. Field example of a rock fall close to the peak of Veleta.

radas (flujos, desprendimientos y deslizamientos), así como un análisis general incluyendo todos los movimientos de ladera conjuntamente.

La extracción de datos se hace en dos fases, en las que se van a obtener dos poblaciones (celdas con deslizamientos y sin deslizamientos). Dichas poblaciones deben tener un tamaño similar en la muestra extraída (BAEZA-ADELL 1994), de manera que ninguna de las dos poblaciones tenga una mayor influencia en los resultados finales del análisis discriminante (SANTACANA 2001; Figura 9).

Las muestras se extraerán en forma de tablas, de manera que para cada tipo de movimiento de ladera tendremos los valores de todos los factores condicionantes para las celdas que representen

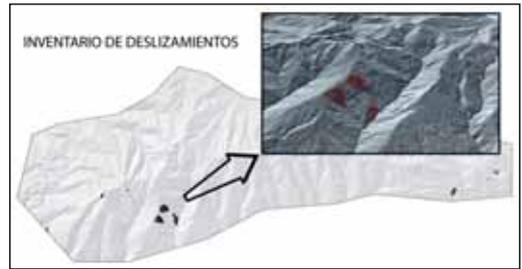


Figura 6. Inventario de deslizamientos.

Figure 6. Inventory of slides.

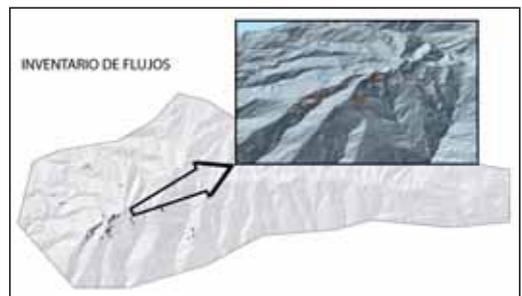


Figura 7. Inventario de flujos.

Figure 7. Inventory of flows.

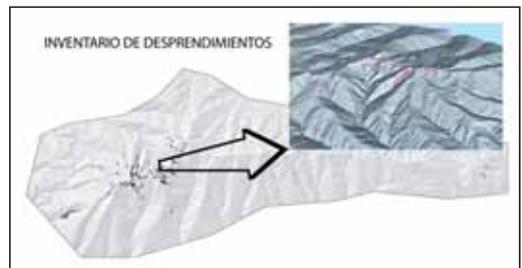


Figura 8. Inventario de desprendimientos.

Figure 8. Inventory of rock falls.

inestabilidades, como para aquellas que no representen inestabilidades. La muestra aleatoria para cada uno de los tipos de movimientos consta de 40,000 puntos (20,000 representando roturas –valor 1, y 20,000 representando ausencia de roturas– valor 2; Figura 10). A estas tablas se les aplicará un tratamiento estadístico con el software SPSS 12.



### Test de normalidad de las variables

Una vez que se ha obtenido la tabla con el conjunto de variables extraídas en toda el área de estudio, se asume que dichas variables representan una muestra de una población cuya distribución es normal (SANTACANA 2001). Aún aceptando dicha hipótesis, se debe comprobar, mediante un test de verificación de todas las variables, el grado de ajuste de la muestra a una distribución normal (SANTACANA 2001).

Esta comprobación se ha realizado, en primer lugar, de forma visual mediante el estudio de los histogramas de frecuencias de las diferentes variables, y posteriormente de forma estadística mediante el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S).

Esta observación visual da una idea de qué variables necesitan transformación y de si las transformaciones realizadas mejoran significativamente la distribución (Figura 11).

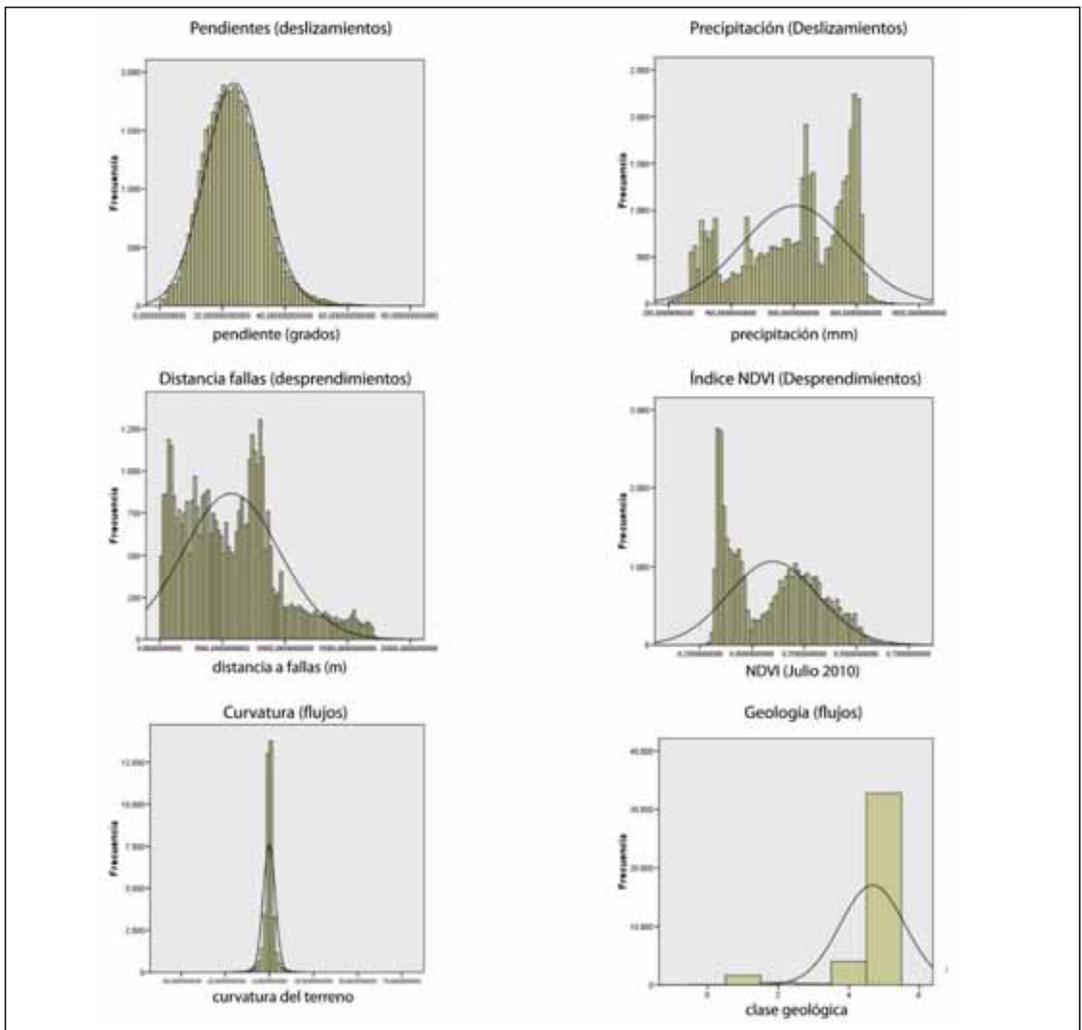


Figura 11. Ejemplo de algunos histogramas para los factores condicionantes.

Figure 11. Example of some histograms for conditioning factors.

Por otro lado, el test de Kolmogorov-Smirnov compara la función de distribución acumulada observada de una variable con una distribución teórica determinada. El test de Kolmogorov-Smirnov se estandariza (variable Z) a partir de la diferencia mayor (en valor absoluto) entre las funciones de distribución acumuladas teórica y observada. Esta prueba de bondad de ajuste coteja si las observaciones podrían razonablemente proceder de la distribución especificada (SPSS 2003).

Se ha adoptado un nivel de significación de un 5%, por lo que aquellas variables que no superen dicho nivel en el test K-S, deberán ser transformadas con objeto de corregir la desviación con respecto a la distribución normal mediante distribuciones logó-normales de uno o dos parámetros tales como  $\log x + \log x + \beta$ .

El resultado es una tabla con todas las variables seleccionadas y con la media, la desviación estándar, la Z de Kolmogorov-Smirnov y la Significancia asintótica (bilateral) para cada variable. Las variables con valores altos de la Z de Kolmogorov-Smirnov y significancia nula deberán ser transformados para adecuarse a una distribución más normal (SANTACANA 2001).

### *Estudio de la dependencia entre variables (Análisis Factorial)*

Las variables utilizadas en el análisis discriminante deberán ser independientes entre sí, por ello se deberán eliminar aquellas variables explicativas que estén correlacionadas más de un 0,98. Para conocer el grado de dependencia o la correlación entre variables así como las agrupaciones de variables con estructura semejante se ha realizado un análisis de componentes principales (ACP).

El análisis de componentes principales o análisis factorial describe la dispersión de una nube de puntos en un espacio multidimensional mediante la definición de un nuevo sistema de ejes (factores). Estos puntos toman los valores de las variables de cada individuo, de forma que la dispersión de los puntos (medida por la varianza muestral) sea la máxima entre todas las combinaciones posibles de las variables originales (DAVID *et al.*

1977). Los factores de mayor interés son aquellos que tienen asociada una mayor varianza.

El método que se propone en este trabajo, utiliza un gran número de variables (tanto externas al MDE, como derivadas del MDE). Un objetivo primario, antes de evaluar la relación de las variables con las inestabilidades de ladera, es el de reducir el número de variables a aquellas que mejor expliquen el máximo porcentaje de la varianza total. Como se apuntó anteriormente, el peso de los distintos factores condicionantes será diferente de unas zonas a otras, y de unos tipos de movimientos a otros. Diremos que las variables analizadas presentan dependencias lineales, cuando algunas de estas variables que definen un factor presentan valores de saturación (peso de la variable en el factor) muy elevados. Si es solo una variable con valor de saturación elevado la que explica dicho factor, esto quiere decir que existe un alto grado de independencia de la variable, con respecto al conjunto restante de variables (SANTACANA 2001).

En este análisis se incluirán aquellas variables que se estimen más adecuadas tras el estudio del grado de ajuste a la distribución normal. En el caso de aquellas variables que hayan sido transformadas, se seleccionará la que mejor se ajuste a dicha distribución. El resultado que ofrece SPSS permite interpretar en qué medida las diferentes variables introducidas en el análisis están relacionadas entre sí, así como, qué variables muestran dependencia lineal.

El grado de dependencia lineal entre las variables se ha obtenido mediante la realización de una matriz de correlaciones. De esta forma, el valor de estos coeficientes oscila entre 0,000 (cuando dos variables son absolutamente independientes entre sí) y 1,000 (cuando dos variables son completamente dependientes entre sí). Como se ha comentado anteriormente, se deberá eliminar del análisis aquellas variables explicativas que estén correlacionadas entre sí más de un 98% (0,980).

### *Relación entre las variables y la inestabilidad.*

#### *Test-T y ONE-WAY*

Una vez que las variables dependientes han sido identificadas para cada una de las tipologías de mo-

vimientos de ladera, se realiza un análisis de contraste de las poblaciones (estable e inestable). Dicho análisis se hace mediante el Test-T (análisis de medias) y el test ONE-WAY (análisis múltiple de la varianza), con el fin de establecer qué variables caracterizan mejor cada población. Se excluirán del análisis discriminante aquellas variables que tengan un menor nivel de significación según el control estadístico adoptado (SANTACANA 2001). En el caso de que sean varias las variables que presentan un alto grado de dependencia lineal, a la hora de realizar el análisis discriminante, se deberá introducir cada una de ellas por separado en combinación con el resto de variables, con objeto de conocer su comportamiento junto con las demás.

El resultado que muestra el programa es una tabla con la media y la desviación típica y una segunda tabla con los estadísticos resultantes de la prueba de Levene y la prueba T. Todos estos datos van a ayudar a seleccionar aquellas variables que marcan una mayor diferencia entre las dos poblaciones estables/inestables para cada tipo de inestabilidad. En general, aquellas variables cuyas medias y desviaciones estándar entre poblaciones estables/inestables sean muy similares, deberán ser rechazadas para el análisis discriminante, puesto que tendrán muy bajo o nulo poder discriminante respecto a la estabilidad/inestabilidad del terreno en cada celda (SANTACANA 2001).

La segunda prueba que compone el contraste entre poblaciones de la muestra, es el test ONE-WAY para varianzas múltiples. El resultado de este test es una tabla cuyo resultado es el valor F y la significación (probabilidad F). El valor F indica que cuanto mayor sea éste, mejor discrimina la variable estudiada (SANTACANA 2001).

Para seleccionar las variables explicativas, se buscará en la matriz de correlaciones aquellas variables cuya correlación entre sí sea superior al 0,9, de las cuales se escogerá solo una para el análisis discriminante. La más adecuada para introducir en el análisis discriminante será aquella que en el test ONE-WAY tenga una F de Fisher mayor con una significancia menor. Como se ha dicho anteriormente, no se rechazará ninguna de las variables, sino que se hará el análisis por separado con

cada una de ellas para comparar su comportamiento con las otras variables.

En el caso de aquellas variables con escaso grado de dependencia lineal, con la ayuda del test-T se rechazarán aquellas variables con medias y varianzas iguales para las dos poblaciones a discriminar, las cuales mostrarán baja o nula significación estadística para la T de Student. De la misma forma, la F de Fisher, resultado del test ONE-WAY, se utilizará en el mismo sentido.

### *Construcción de la función discriminante*

El objetivo del análisis discriminante es construir una función con el menor número de variables que separe las poblaciones de celdas estables e inestables (SANTACANA 2001). Las variables seleccionadas anteriormente que entrarán en el análisis discriminante deben ser independientes y con una gran significancia estadística. Se asume que estas variables muestran una distribución normal. El análisis discriminante, a su vez, hace una selección entre las variables introducidas mediante el llamado método por pasos. Dicho método excluye variables una a una en la función discriminante hasta que se genera la función más significativa que incluya el menor número de variables (SANTACANA 2001).

El resultado obtenido en este análisis es una tabla con los coeficientes no tipificados (coeficientes por los que se va a multiplicar cada variable). Se han obtenido por tanto 3 tablas (Tablas 2, 3 y 4); una con los coeficientes para flujos, los coeficientes para deslizamientos, y los coeficientes para deslizamientos. Tras realizar varias combinaciones de funciones discriminantes, se ha decidido que las más adecuadas para el caso de Sierra Nevada son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Susc\_desprendim} = & (0,00249 * [\text{mdefill}]) + \\ & (0,00537 * [\text{pend}]) - (0,00252 * [\text{ori180}]) + \\ & (0,02492 * [\text{pendm}]) - (0,00725 * [\text{ins}]) - (0,00004 \\ & * [\text{dist\_fallas}]) + (0,00004 * [\text{dist\_pliegues}]) - \\ & (0,35911 * [\text{ndvi\_jul2010}]) - (0,01906 * [\text{p0}]) - \\ & (0,00073 * [\text{precip}]) + (0,01050 * [\text{snow\_durac}]) - \\ & (0,00005 * [\text{tmax\_1k}]) + (0,00043 * [\text{tmin\_1k}]) - \\ & 5,63719 \end{aligned}$$

Deslizamientos		
	Coeficientes	
Variable	Est.	No Tipif.
pend	0,1002	0,01098
ori90	0,2933	0,00583
pendm	0,0759	0,00751
dist_falla	-0,1793	-0,00005
dist_plieg	-0,2898	-0,00010
geolog	0,2241	0,28785
ndvi_jul20	-0,2682	-1,53330
p0	-0,5671	-0,05372
precip	1,0465	0,00637
tmax_1k	0,7087	0,00026
tmin_1k	0,5984	0,00019
(Constante)		-8,89555

Tabla 2. Coeficientes (estándares y tipificados) de los factores condicionantes para deslizamientos.

Table 2. Coefficients (standard and typified) of the conditioning factors for slides.

Desprendimientos		
	Coeficientes	
Variable	Est.	No Tipif.
mdefill	1,24074	0,00249
pend	0,04882	0,00537
ori180	-0,12348	-0,00252
pendm	0,27744	0,02492
ins	-0,19146	-0,00725
dist_falla	-0,13778	-0,00004
dist_plieg	0,11320	0,00004
ndvi_jul20	-0,06127	-0,35911
p0	-0,19557	-0,01906
precip	-0,09472	-0,00073
snow_durac	0,60907	0,01050
tmax_1k	-0,13425	-0,00005
tmin_1k	1,24226	0,00043
(Constante)		-5,63719

Tabla 3. Coeficientes (estándares y tipificados) de los factores condicionantes para desprendimientos.

Table 3. Coefficients (standard and typified) of the conditioning factors for rock falls.

Flujos		
	Coeficientes	
Variable	Est.	No Tipif.
mdefill	0,911940764	0,0020
pendm	0,307398322	0,0271
pla	0,036632002	0,0189
dist_plieg	0,386792484	0,0001
ndvi_jul20	-0,257034046	-1,6625
p0	-0,066451598	-0,0060
precip	0,400685275	0,0034
snow_durac	0,633898686	0,0114
tmax_1k	0,260902656	0,0001
tmin_1k	0,898291389	0,0004
(Constante)		-11,2675

Tabla 4. Coeficientes (estándares y tipificados) de los factores condicionantes para flujos.

Table 4. Coefficients (standard and typified) of the conditioning factors for flows.

$$\begin{aligned}
 \text{Susc\_deslizam} = & (0,01098 * [\text{pend}]) + (0,00583 * \\
 & [\text{ori90}]) + (0,00751 * [\text{pendm}]) - (0,00005 * \\
 & [\text{dist\_fallas}]) - (0,00010 * [\text{dist\_pliegues}]) + \\
 & ([\text{geolog}] * 0,28785) - ([\text{ndvi\_jul2010}] * 1,53330) - \\
 & ([\text{p0}] * 0,05372) + ([\text{precip}] * 0,00637) + \\
 & ([\text{tmax\_1k}] * 0,00026) + ([\text{tmin\_1k}] * 0,00019) - \\
 & 8,89555
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Susc\_flujos} = & ([\text{mdefill}] * 0,0020) + ([\text{pendm}] * \\
 & 0,0271) + ([\text{pla}] * 0,0189) + ([\text{dist\_pliegues}] * \\
 & 0,0001) - ([\text{ndvi\_jul2010}] * 1,6625) - ([\text{p0}] * \\
 & 0,0060) + ([\text{precip}] * 0,0034) + ([\text{snow\_durac}] * \\
 & 0,0114) + ([\text{tmax\_1k}] * 0,0001) + ([\text{tmin\_1k}] * \\
 & 0,0004) - 11,2675
 \end{aligned}$$

### Generación de los mapas de susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad es el objetivo final del análisis de susceptibilidad. Para su realización se han decidido establecer siete niveles de suscepti-

bilidad. Este mapa se obtendrá a partir del cruce en el SIG de aquellas variables que han quedado en la función discriminante. Para cada tipología de movimiento de ladera, se ha realizado un mapa de susceptibilidad (Figuras 12, 13 y 14).

A continuación se ha realizado un mapa que expresa la susceptibilidad frente a cualquier movi-

miento de ladera. Para ello, se ha extraído el valor máximo de susceptibilidad en cada celda a partir de los tres mapas desarrollados anteriormente (Figura 15).

A cada mapa se le ha superpuesto el inventario de movimientos de ladera correspondiente, con objeto de validarlo de forma visual.

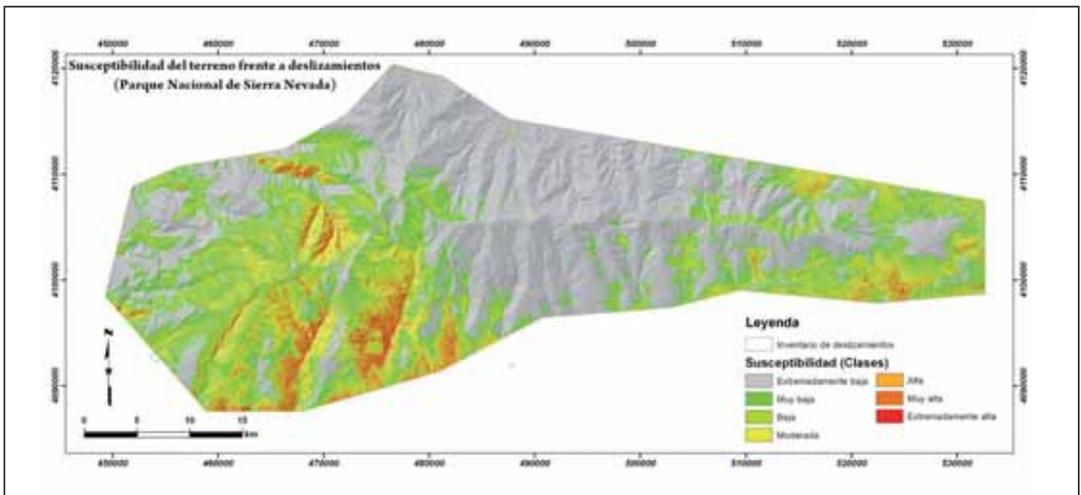


Figura 12. Mapa de susceptibilidad frente a deslizamientos.

Figure 12. Susceptibility map of slides.

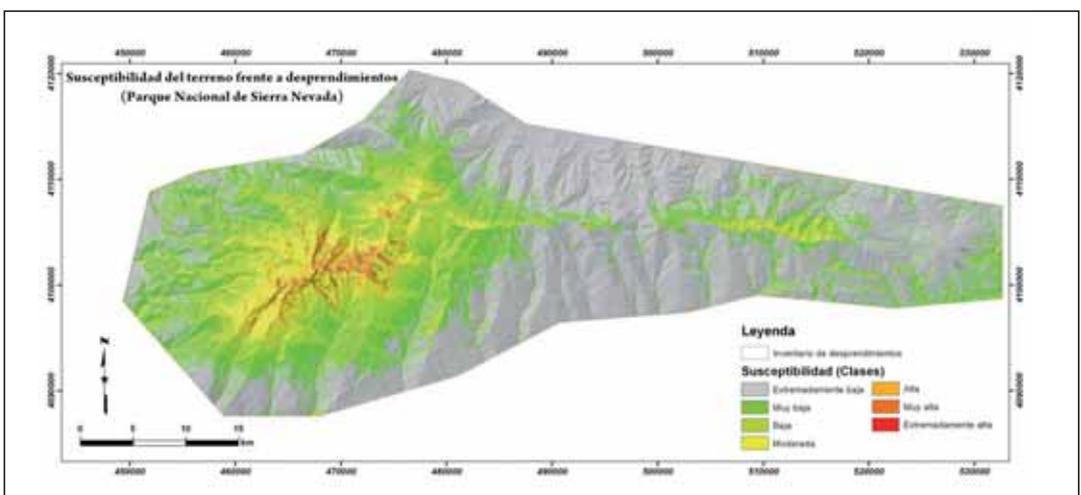


Figura 13. Mapa de susceptibilidad frente a desprendimientos.

Figure 13. Susceptibility map of rock falls.

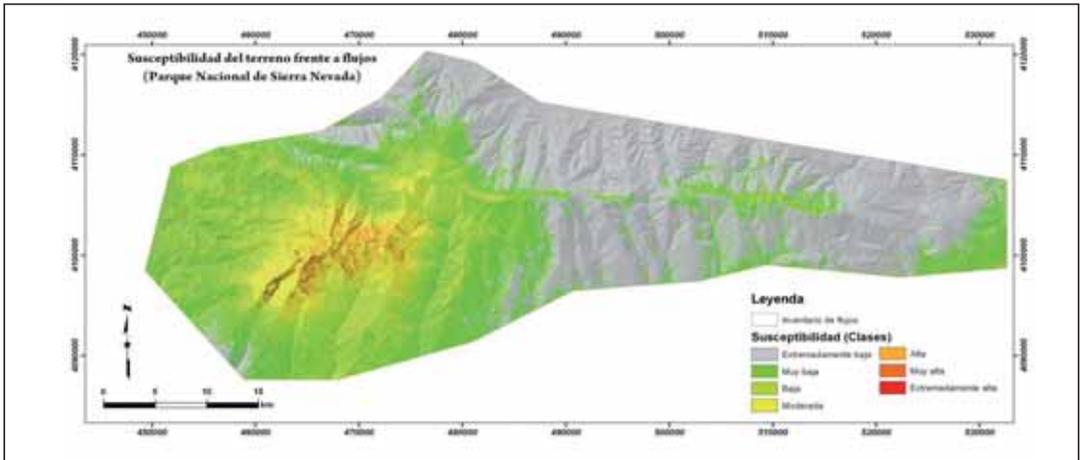


Figura 14. Mapa de susceptibilidad frente a flujos.

Figure 14. Susceptibility map of flows.

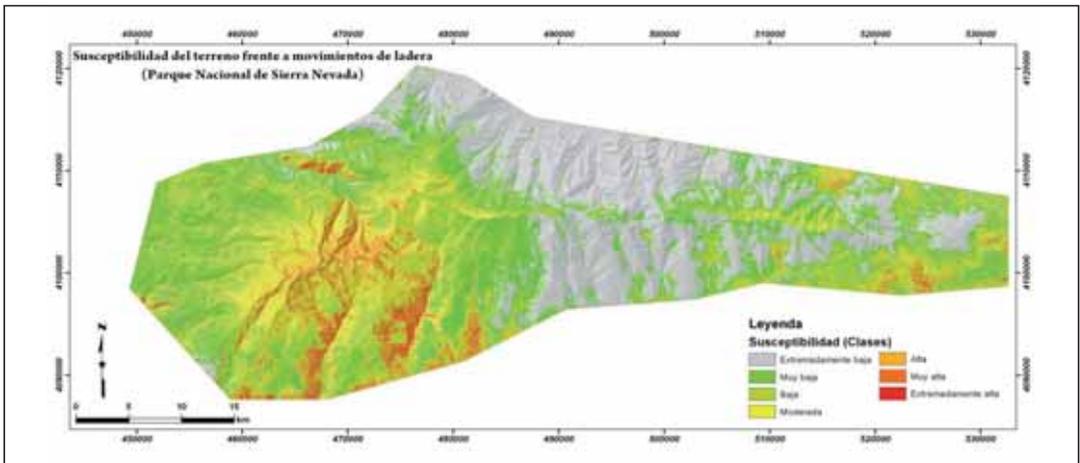


Figura 15. Mapa de susceptibilidad frente a movimientos de ladera.

Figure 15. Susceptibility map of slope instabilities.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El mapa de susceptibilidad frente a movimientos de ladera realizado para el Parque Nacional de Sierra Nevada constituye el primer documento de zonificación del terreno frente a este tipo de inestabilidades. Para la realización de este tipo de mapas, tradicionalmente se ha contado con un reducido número de variables condicionantes (litología, usos del suelo, pendientes, alturas, otros

parámetros obtenidos del MDE, etc). Ejemplos de mapas realizados anteriormente en áreas cercanas, solo tenían en cuenta 4 ó 5 variables a la vez (IRIGARAY-FERNÁNDEZ 1995; EL HAMDOUNI 2001; IRIGARAY-FERNÁNDEZ & CHACÓN-MONTERO 2002). Con el método propuesto en este trabajo se tienen en cuenta, *a priori*, todas las posibles variables del terreno que pudieran tener influencia en la susceptibilidad del mismo frente a movimientos de ladera. El método propuesto por

SANTACANA 2001 tiene en cuenta todas las posibles variables derivadas del Modelo Digital de Elevaciones. El modelo digital de elevaciones utilizado, con cinco metros de resolución de pixel, es el más preciso que existe actualmente para esta zona. Por esta razón, se puede concluir que las variables derivadas del MDE han sido evaluadas con la mayor precisión posible.

En los métodos de evaluación de la susceptibilidad frente a movimientos de ladera basados en análisis estadísticos multivariantes, los inventarios previos tienen una gran importancia. Para este estudio se ha realizado un inventariado muy preciso de cada uno de los tipos de movimientos analizados (deslizamientos, desprendimientos y flujos). Cada inventario se ha validado en campo, mediante la cartografía y descripción de las inestabilidades reconocidas en la foto aérea.

A las variables extraídas del MDE se le han añadido nuevos factores condicionantes que no se habían tenido en cuenta previamente en estudios de este tipo, siendo algunos de estos específicos de la zona (tales como el número de ciclos de fusión de nieve y el número de días de permanencia de la misma). Estas variables han demostrado tener un gran peso en la zonificación del terreno. El índice de vegetación normalizado obtenido por medio de las bandas roja, azul e infrarroja cercana de la imagen de Satélite LandSat TM (julio de 2010) tiene un gran peso en los tres tipos de movimientos analizados. Este índice refleja el estado de la vegetación en un momento concreto del tiempo, por lo que sería muy interesante en un futuro estudiar la variación del mismo en el tiempo, e incluso sus variaciones estacionales. Estas variaciones podrían tener una influencia importante en la susceptibilidad del terreno frente a movimientos de ladera.

La influencia de la tectónica activa es un factor difícil de evaluar en este tipo de estudios. Sierra Nevada es una de las regiones tectónicamente más activas de la Península Ibérica, y por tanto esta actividad tectónica puede tener influencia en la generación de inestabilidades de ladera. Normalmente esta actividad se tiene en cuenta como un factor desencadenante, no condicionante (deslizamientos desencadenados por terremotos). En este estudio se ha evaluado la distancia a estruc-

turas tectónicas activas (pliegues y fallas), y se ha comprobado que ambas variables tienen influencia como factores condicionantes.

El tipo y uso del suelo, se ha evaluado conjuntamente a través del umbral de escorrentía. Este factor, que no ha sido tenido en cuenta en estudios previos, tiene una importancia diferente en los distintos tipos de movimientos; presentan un gran peso en la susceptibilidad frente a deslizamientos, y mucho menor en flujos y desprendimientos. Este hecho refuerza la idea de que en este tipo de estudios de susceptibilidad, se deben de realizar por separado los análisis frente a las diferentes tipologías de inestabilidades, pues los factores que influirán en unos y otros pueden no tener el mismo peso, e incluso ser diferentes.

Tradicionalmente, en muchos de los estudios de susceptibilidad frente a movimientos de ladera realizados en zonas cercanas, no se ha tenido en cuenta la diferenciación de los distintos tipos de movimientos. Tal y como se deduce de los resultados de este estudio, esta diferenciación es vital para el correcto análisis de la susceptibilidad. El método aplicado (SANTACANA 2001) permite la evaluación estadística previa de las variables consideradas para cada uno de los tipos de movimientos analizados. El mapa de susceptibilidad total frente a movimientos de ladera, se ha realizado a partir de los mapas específicos de susceptibilidad frente a deslizamientos, flujos y desprendimientos.

Los mapas de susceptibilidad realizados en este estudio constituyen documentos de partida para una mejor gestión de las infraestructuras del Parque Nacional de Sierra Nevada, ya que delimitan aquellas zonas más susceptibles y permiten adoptar medidas de prevención tales como: mejor diseño de vías de comunicación, ubicación óptima de instalaciones, reconocimiento de zonas altamente susceptibles y posibilidad de restricción de acceso a las mismas, etc.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido financiado por el Organismo Autónomo Parques Nacional del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (proyecto 083/2007).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYALA-CARCEDO, F.J. & ANDREU, F.J. (Ed.) 1987. Manual de Taludes. Serie Geotecnia, Madrid. 456 pp.
- BAEZA-ADELL, C. 1994. Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante. Tesis doctoral, ETSECCPB-UPC.
- CARRARA, A. 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Math Geology* 15: 403-426.
- COROMINAS, J. 1992. Landslide risk assessment and zoning. En: A. Cendrero, G. Luttig & F.C. Wolff (eds.), *Planning the use of the Earth's Surface. Lecture Notes in Earth Sciences* 42. SpringerVerlag. pp. 141-173.
- DAVID, M., DAGBRT, M. & BEAUCHEIMIN, Y. 1977. Correspondence analysis. *Quarterly of the Colorado School of Mines* 72: 1-45.
- EL HAMDOUNI, R. 2001. Estudio de movimientos de ladera en la cuenca del Río Ízbor mediante un SIG: Contribución al conocimiento de la relación entre tectónica activa e inestabilidad de vertientes. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, 429 pp.
- FELICÍSIMO, A.M. 1992. Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en las ciencias ambientales. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- HATANO, S. 1976. A method of hazard classification for survival slides caused by heavy rainfall. *Proc. 13<sup>th</sup> Nat. Dis. Sci. Sump* 13: 3-4.
- IRIGARAY-FERNÁNDEZ, C. & CHACÓN-MONTERO, J. 2002. Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante S.I.G. En: F.J. Ayala Carcedo & J. Corominas Dulcet (eds), *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España*. pp. 21-36. Instituto Geológico y Minero de España.
- IRIGARAY-FERNÁNDEZ, C. 1995. Movimientos de ladera: Inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada). Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- KEITH-TURNER, A. & SCHUSTER, R.L. (ed.) 1996. *Landslides. Investigation and mitigation*. Special report 247. National Academy Press. Washington D.C. 675 pp.
- NEULAND, H. 1976. A prediction model for landslips. *Catena* 3: 215-230.
- OKIMURA, T. 1983. A prediction system for the site of probable surface failure of mountain-slope by topographical factors. *Proc. J.S.C.E.* 338: 131-138.
- OYAGI, N. 1984. Landslides in weathered rocks and residual soils in Japan and surrounding areas: a state-of-the-art report. 4<sup>th</sup> Int. Symp. On Landslides, Toronto, 3: 1-31.
- SANTACANA, N. 2001. Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la cuenca alta del Río Llobregat. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- SANTACANA, N., BAEZA, B., COROMINAS DULCET, J., PAZ, A.D. & MARTURIÁ, J. 2003. A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Poble de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards* 30: 281-295.
- SOETERS, R. & VAN WESTEN, C.J. 1996. Chapter 8: Slope instability recognition, analysis and zonation. En: A.K. Turner & R.L. Schuster (eds), *Landslides investigation and mitigation*. Special Report 247. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 129-177.
- SPSS, 2003. *SPSS para Windows V12 Base Manual*. SPSS Inc.
- YESARES-GARCÍA, J., 2008. Elección, adaptación y aplicación de un método de análisis de susceptibilidad a deslizamientos. Tesis de Master, Universidad de Granada, Granada, 86 pp.
- ZARUBA, Q. & MENCL, V. 1969. *Landslides and their control*. Elsevier Verlag, Amsterdam.