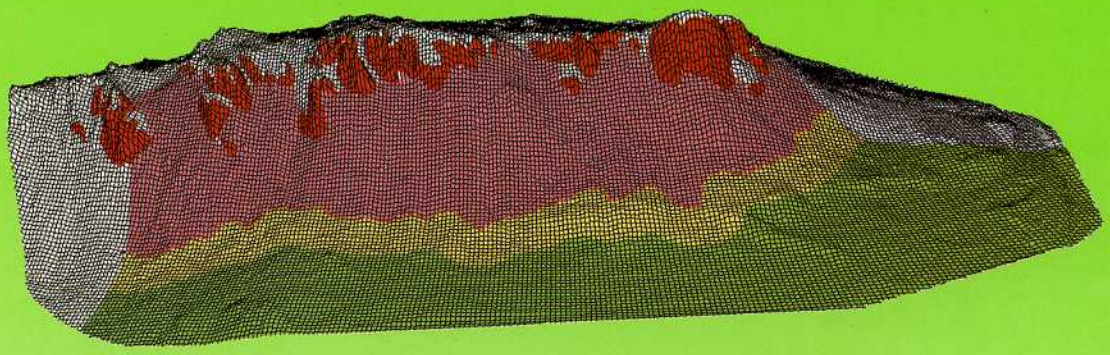
PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
Serie: MEDIO AMBIENTE N° 4

# Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG



Editores: Francisco J. Ayala-Carcedo
Jordi Corominas

MINISTERIO
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA

Instituto Geológico
y Minero de España

Serie: MEDIO AMBIENTE. RIESGOS GEOLÓGICOS
Editores: Francisco J. Ayala-Carcedo y Jordi Corominas

MAPAS de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG / Ayala Carcedo, F. J. y Corominas, J., editores - Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2002.
194 pp. - (Serie: Medio Ambiente; N° 4)
ISBN: 84-7840-466-X

Movimientos de ladera. Riesgo Natural. IGME.

Portada: Imagen 3D de la Sierra de La Cabrera (Madrid) con zonificación de susceptibilidad al alcance de bloques desprendidos. Tratamiento SIG: *Luis Laín.*

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación en esta obra sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto de los citados derechos.

© Instituto Geológico y Minero de España
Ríos Rosas, 23 - 28003 Madrid
Tel. 913 495 700
Fax 914 426 216
Web: http:\\www.igme.es
ISBN: 84-7840-466-X
NIPO: 405-02-008-X
Depósito Legal: M-5853-2003

Imprime: Gráficas Chile, S.A.L. - C/. Chile, 27 - 28016 MADRID - e-mail: graficaschile@wanadoo.es

Carrasco, R. M., de Pedraza, J., Martín-Duque, J. F., Mattera, M., Bodoque, J., Sanz, M. A. y Díez-Herrero, A. (2002). Cartografía de zonas de susceptibilidad o propensión a los movimientos en masa en el Valle del Jerte (Sistema Central español). En: F. J. Ayala-Carcedo y J. Corominas, (eds.). *Mapas de susceptiblidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España,* Instituto Geológico y Minero de España, *133-154*

# CARTOGRAFÍA DE ZONAS DE SUSCEPTIBILIDAD O PROPENSIÓN A LOS MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DEL JERTE (SISTEMA CENTRAL ESPAÑOL)

**R. M. Carrasco[1], J. de Pedraza[2], J. F. Martín-Duque[2], M. Mattera[2], J. Bodoque[2], M. A. Sanz[2] y A. Díez-Herrero[1]**

[1] Dpto. de Ingeniería Geológica y Minería, Facultad de Ciencias del Medio Ambiente, UCLM, Avda. Carlos III, s/n, 45071 Toledo.
E-mail: carrasco@amb-to.uclm.es

[2] Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense C/ José Antonio Novais, s/n, 28040 Madrid.

## INTRODUCCIÓN

La presencia de depósitos superficiales que recubren sus laderas, es una constante a lo largo de todo el Sistema Central español y ello se ha puesto de manifiesto en múltiples trabajos. Con el inicio de una serie de investigaciones sobre Geomorfología regional, en la década de los años 1970 comienzan a separarse los diferentes sistemas morfogenéticos que contribuyen a modelar el relieve de estas montañas y, al mismo tiempo, dan origen a esos depósitos superficiales que las recubren.

Aún en esas nuevas circunstancias, son escasas las formaciones superficiales genéticamente atribuidas a los movimientos en masa; las acciones debidas a los procesos gravitacionales se limitan al ambiente periglaciar o se las incluye en un conjunto genéticamente heterogéneo (mezcla de procesos de arroyada, periglaciares y gravitacionales) que se viene denominando "coluviones" (ver p. ej.: MAGNA, 1981 a 2000).

En el Valle del Jerte sin embargo, se ha puesto de manifiesto la importante contribución de los procesos gravitacionales en el modelado de las laderas, y se citan abundantes depósitos debidos a los movimientos en masa (Carrasco y Pedraza, 1992).

En este Valle, una depresión intramontañosa tipo graben localizada en el extremo occidental de la Sierra de Gredos (figura 1, foto 1), se han identificado 830 movimientos en masa que ocupan el 23% de su superficie total; de todos ellos, el 36% corresponden a caídas, el 56% a deslizamientos de varios tipos, y el 8% a flujos de barro y de derrubios.

Litología, morfología, tectónica, régimen climático, hidrogeológico e hidrológico, cobertera vegetal, y actividad antrópica, son los factores responsables de la configuración actual de las vertientes del Valle del Jerte. De acuerdo con esos factores y teniendo en cuenta la evolución de la dinámica geológica en esta área, es posible establecer tres etapas morfogenéticas que se han sucedido a lo largo del Cuaternario: en la primera, la más antigua, tiene lugar la consolidación del graben con una importante actividad tectónica; en la segunda, aumenta notablemente la incisión en los valles como

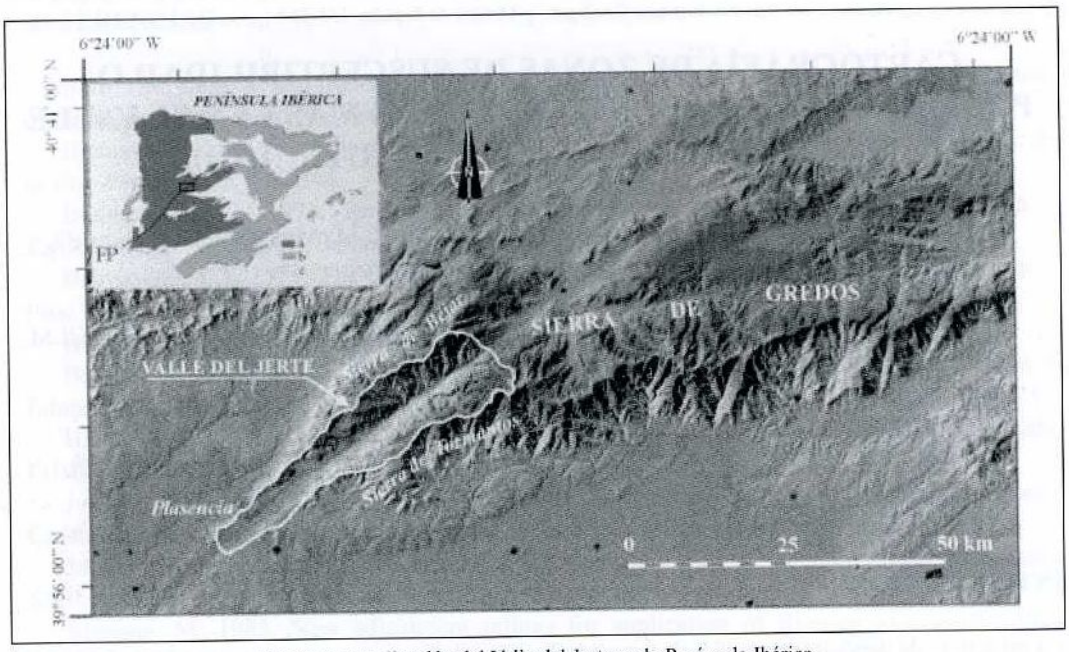



Figura 1. Localización del Valle del Jerte en la Península Ibérica.
a) Macizo Hespérico o Ibérico; b) Sistemas montañosos alpinos; c) Cuencas terciarias; FP) Falla de Plasencia.

*Figure 1. The Jerte Valley in the Iberian Peninsula.*
*a) Iberian or Hesperic Massif; b) Alpin mountain ranges; c) Tertiary basins; FP) Plasencia Fault.*

consecuencia de los periodos húmedos y las etapas frías (glaciares y periglaciares); y en la tercera, la más reciente, destaca la aparición de la actividad antrópica como nuevo factor.

En el caso de los movimientos en masa esas tres etapas morfogenéticas han quedado reflejadas en unos signos diferenciales que permiten agrupar esos movimientos en una secuencia definida por tres generaciones; para delimitar cada una de ellas se han considerado los siguientes datos:

- Cronología, establecida mediante criterios geomorfológicos y estratigráficos y tomando como base de referencia para la asignación de edades, el sistema de terrazas del río Jerte (datado a su vez mediante correlaciones regionales; Goy y Zazo, 1987).
- Distribución espacial y relación con elementos morfológicos destacables (escarpes, trazas de falla, red fluvial, etc.). Estos parámetros se determinaron mediante el análisis estadístico a partir de los parámetros establecidos por Brunsden (1973) y siguiendo un procedimiento similar al aplicado por Irigaray y Chacón (1991) en la Cordillera Bética.
- Tipo de movimiento; las tipologías básicas se ajustan a las definidas por Varnes (1978) y la nomenclatura en castellano es la propuesta por Corominas y García Yagüe (1997) con algunas modificaciones (Dikau *et al.*, 1996).

- Asociación genética más probable, determinada mediante la correlación entre la secuencia de movimientos y la de los factores dominantes a lo largo del Cuaternario.

A partir de esos datos las características concretas de los movimientos de cada una de esas generaciones pueden resumirse como sigue (Carrasco, 1997, 1999):

- La *primera generación* agrupa los movimientos en masa cuya fase crítica o paroxísmica (desencadenamiento) tuvo lugar antes del Pleistoceno superior. Son deslizamientos que desde el punto de vista cinemático pueden clasificarse como simples y múltiples, aunque excepcionalmente aparecen algunos complejos. Presentan roturas profundas que llegan a afectar a los materiales del sustrato (por lo general granito arenizado) y la extensión superficial de las lenguas varía entre 0,3 km² de media, llegando en casos excepcionales a 3 km². Uno de los rasgos más destacados de los movimientos en masa de esta generación, es la baja aleatoriedad de su distribución espacial: la correlación fuerte y directa entre la localización de los deslizamientos y las alineaciones de fractura, así como entre superficie total de terreno afectada por movimientos y proximidad a los escarpes de línea de falla, son criterios que se vienen utilizando (Crozier *et al.*, 1995; Alexander and Formichi, 1993) como indicadores de que la actividad tectónica es uno de los factores que controlan el desencadenamiento de estos fenómenos.

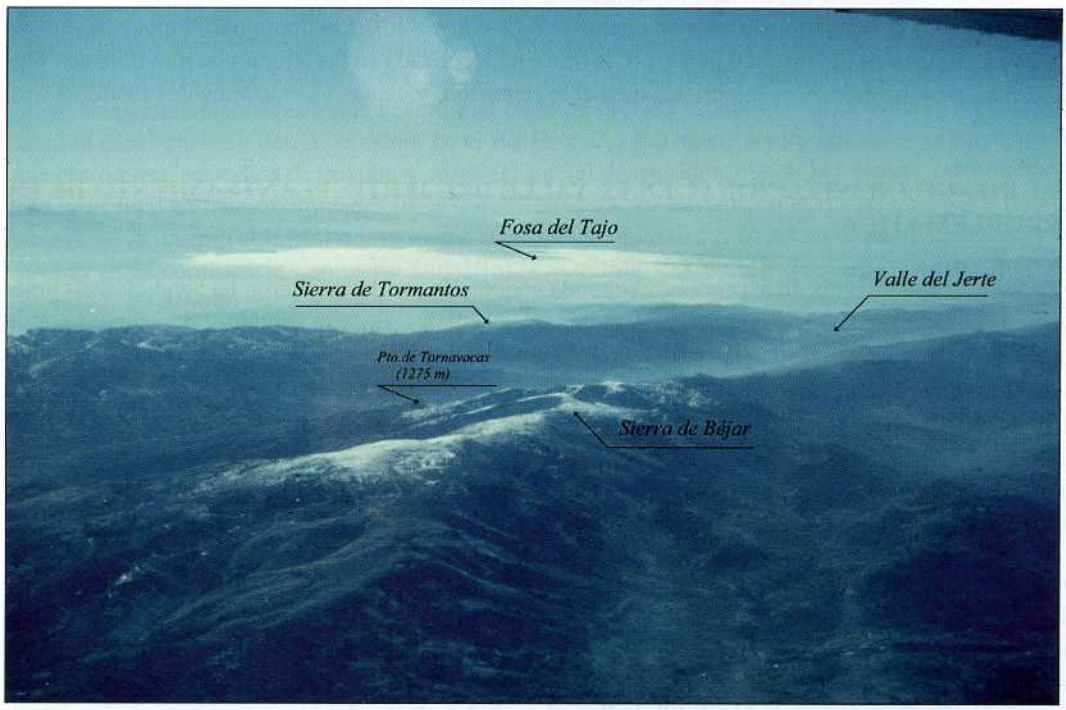



Foto 1. Vista general de las unidades del relieve en el entorno del Valle del Jerte.

*Photo 1. General view of relief units in the Jerte Valley.*

- La *segunda generación* agrupa los movimientos en masa cuya fase crítica o paroxísmica (desencadenamiento) tuvo lugar entre el Pleistoceno medio y el Holoceno antiguo (tiempos previos a la Edad del Bronce). Se trata de deslizamientos simples de derrubios, flujos de derrubios y flujos de barro, que movilizan menos material que los de la primera generación dado que afectan preferentemente al regolito y sólo en algunos casos a los materiales del sustrato; también existen caídas que forman canchales. Sus dimensiones oscilan entre 0,02 $km^2$ de media y pueden llegar a 0,1 k $m^2$. Deslizamientos y flujos muestran una tendencia a localizarse en las laderas conectadas con los lechos de torrenteras; sin embargo, también es buena la correlación entre la localización de esos fenómenos y otras variables (densidad de red de fracturas, regolito, orientación, pendientes, etc.). Las caídas se localizan preferentemente en escarpes y cresterías de macizos rocosos, tampoco en este caso la fuerte correlación entre estas variables es excluyente: densidad de fracturas y diaclasado, tipo de roca, altura del escarpe o crestería, cota absoluta del escarpe, etc., muestran igualmente una alta o media correlación con la localización de estos fenómenos. De acuerdo con estas consideraciones, debe decirse que la distribución de estos movimientos presenta un grado de aleatoriedad muy superior a los de primera generación.

- La *tercera generación* agrupa los movimientos en masa cuya fase crítica o paroxísmica (desencadenamiento) ha tenido lugar con posterioridad al Holoceno antiguo (a partir de la Edad del Bronce) y, por tanto, la actividad humana puede considerarse ya como un factor más de ese proceso; este intervalo de tiempo en otros trabajos (Flageollet, 1994) se divide en tres rangos temporales para los movimientos en masa: históricos antiguos, históricos-recientes, y actuales. Se trata de fenómenos cuya distribución espacial presenta dos poblaciones: una similar a la descrita para los movimientos de segunda generación y con sus mismas tipologías, aunque de dimensiones menores (de media 0,006 $km^2$); la otra está localizada en las lenguas de movimientos previos, movilizando estos materiales mediante reptación, y caídas y deslizamientos menores.

## EL RIESGO GRAVITACIONAL EN EL VALLE DEL JERTE: PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

Todos los movimientos de la primera y segunda generación, se desarrollaron en condiciones climáticas, geomorfológicas y tectónicas, diferentes a las actuales. En este sentido y de acuerdo con la terminología más usual al respecto (UW/PWL, 1993), habría que clasificarlos como "inactivos relictos". Sin embargo, en algunas de esas lenguas se han observado claros signos de actividad: movimiento lento tipo reptación, caídas y deslizamientos puntuales de pequeñas dimensiones, grietas, invasión de vías de comunicación, roturas en los vallados, etc. (foto 2). En principio esos movimientos se localizan preferentemente en áreas intensamente modificadas por la actividad antrópica, lo que sugiere que se trata de un proceso de reactivación inducida; es importante señalar que algunas poblaciones así como grandes extensiones de cultivo, están localizadas sobre lenguas de antiguos deslizamientos. No obstante, hay otras lenguas en las que también se ha detectado actividad aunque el grado de transformación antrópica sea menor (de hecho mantienen parte de la vegetación natural de bosque de roble); dadas sus características y la disponibilidad de datos, puede tomarse como ejemplo significativo el deslizamiento múltiple de derrubios correspondiente a la primera generación y denominado de "Rebollar". Las dudas planteadas respecto a la verdadera implicación antrópica como factor desencadenante de estos procesos, son la base de las investigaciones que se vienen realizando en este Valle en lo concerniente a riesgos naturales.

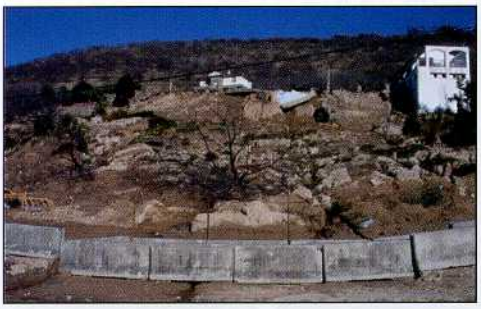


Foto 2. Deslizamiento ocurrido el 17 de enero del 2001 en la localidad de Tornavacas, movilizando parte del material de otro previo.

*Photo 2. Landslide hapenned on 17 January 2001 in Tornavacas, mobilising part of a former one.*

Otro tipo de movimientos se localizan preferentemente en las laderas de las gargantas, existan o no casos previos en las mismas. Se trata de deslizamientos de derrubios (*debris slides*) y corrientes o flujos de derrubios (*debris flow*), en ocasiones canalizados a favor de la red hidrográfica, y se ha podido seguir y analizar en un caso ocurrido el 24 de enero de 1996 en las vertientes del Arroyo de Jubaguerra (fotos 3 y 4) tras un periodo de precipitaciones copiosas. El fenómeno se inició con un deslizamiento de derrubios en la ladera derecha de la garganta y siguiendo una trayectoria ortogonal al lecho de la misma; su extensión superficial es 6500 m², la superficie de rotura es poco profunda (afectó esencialmente al regolito) y su extremo inferior llega hasta el lecho del canal. Los materiales movilizados obturaron el canal del torrente (quedan restos del cierre en ambas márgenes) y su desmantelamiento posterior generó una onda de crecida rápida que se extendió a lo largo de todo el canal hasta su desembocadura en el río Jerte, 2,5 km aguas abajo. Durante ese trayecto, se generaron tres episodios de erosión y carga (el inicial desencadenante de la avenida, otro intermedio, y el final en las proximidades de la desembocadura del torrente en el río Jerte) y otros tres de abandono de carga (el inicial e intermedio tras sendos umbrales rocosos en el lecho del canal y el último en la confluencia con el río emisario). Las similitudes de este fenómeno con un flujo de derrubios canalizado son evidentes y de hecho las discusiones al respecto son numerosas (ver p. ej.: Pierson and Costa, 1987; Corominas *et al.*, 1996), sin embargo, esa secuencia erosivo deposicional y las características de los depósitos, parecen más propias de una avenida torrencial y así se considera en este caso.

Independientemente de esa problemática científica, lo cierto es que este fenómeno es un buen indicador de la interrelación dinámica entre movimientos en masa y la actividad torrencial. Esto implica un nuevo factor de peligrosidad, en principio menos previsible que los descritos previamente como reactivaciones.

Dadas estas circunstancias y aunque el objetivo a largo plazo sea evaluar los riesgos naturales debidos a los movimientos en masa en este Valle, a corto y medio plazo es necesario disponer de una información útil para determinar áreas críticas que pueden verse afectadas por estos procesos; éste es el objetivo básico de la cartografía de zonas de "susceptibilidad o propensión" (Brabb, 1984; Varnes *et al*, 1984; Carrara *et al*, 1995; Ayala, 1995). En el caso que nos ocupa y como ya se ha señalado (Carrasco *et al.*; 2000), dicha cartografía es esencial por dos motivos: es de ejecución bas-

Foto 3. Cicatriz y superficie de rotura debida a un deslizamiento de derrubios (debris slide) en la ladera derecha del Arroyo de Jubaguerra.

*Photo 3. Scar and failure surface of a debris slide in the right hillslope of Jubaguerra creek.*

Foto 4. Detalle del primer tramo de deposición en el Arroyo de Jubaguerra. Nótese el espesor de los depósitos, teniendo en cuenta que los árboles que aparecen parcialmente cubiertos son cerezos que se localizaban en cultivos al borde del arroyo.

*Photo 4. A detail of the first section of deposition in the Jubaguerra Creek. See the deposits thickness, taking into account that tress partly covered are cherry trees previously located at the creek bank.*

tante inmediata y constituye el paso previo que debe realizarse para elaborar los mapas de riesgo total siguiendo el procedimiento de la UNDRO y UNESCO (1972); su aplicación es directa en planificación y gestión territorial donde se utilizan estas cartografías como "factor limitante" que sirve para restringir la expansión de la actividad humana.

De acuerdo con la idea original, los mapas de susceptibilidad (Varnes *et al.*, op. cit.) deben mostrar la localización de los procesos y proporcionar información sobre el tiempo o probabilidad de su ocurrencia (periodo de retorno). Sin embargo y como se ha apuntado en diversos trabajos (ver p. ej.: Corominas, 1988; Ayala, 1995; Ferrer, 1995), a veces resulta sumamente difícil realizar una previsión temporal de un fenómeno y la información queda limitada a una predicción espacial (zonificación de la susceptibilidad); en este sentido, hay quienes diferencian claramente dos etapas para elaborar un mapa de peligrosidad: una cartografía de zonas de susceptibilidad, y un análisis de la probabilidad de ocurrencia (Carrara *et al.*, 1995).

## PROCEDIMIENTO PARA ELABORAR LOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD O ZONACIÓN

Como se ha señalado, un mapa de susceptibilidad representa las zonas de un territorio que están o pueden estar bajo la acción de un proceso determinado; puede decirse por tanto, que se trata de una cartografía de "procesos activos". La elaboración de estos mapas es tanto más sencilla cuanto mejor definido esté el agente que regula el proceso y cuanto mayor sea la población de datos sobre los signos característicos de su actividad.

Respecto al procedimiento de ejecución de los mapas, aquí se emplean técnicas automáticas; tanto la integración y gestión de la información espacial como el tratamiento estadístico y la implementación de los resultados, se ha realizado en un único soporte SIG. Es bien conocido que estas técnicas son las más adecuadas para abordar fenómenos que tienen una distribución espacial sobre la superficie terrestre y que se plantean desde una perspectiva multivariable (ver p.ej.: Maguire *et al.*, 1991; Burrough, 1996; Pascolo y Brebbia, 1998).

El principal problema a resolver en la mayoría de estos procedimientos, es la definición y evaluación (cuantitativa o cualitativa) de los factores (variables o parámetros) implicados en el fenómeno, para así poder determinar su influencia (peso) en el resultado final del proceso que se investiga. En lo que se refiere a la peligrosidad de los movimientos en masa y su zonificación, los factores implicados están ya casi estandarizados (ver p.ej.: Varnes *et al.*, 1984; Ayala, 1987; Giani, 1992; Carrara *et al.*, 1995); no sucede así con la estimación de su influencia (peso), la cual puede variar además en función del contexto regional. A este respecto han surgido múltiples alternativas, que van desde las denominados métodos determinísticos o geotécnicos a los estadísticos, o también los heurísticos (ver: Cottecchia, 1978; y Carrara *et al.*, 1995).

Los parámetros considerados en el Valle del Jerte son el resultado de la aplicación de los conocimientos generales ya establecidos (recogidos en la bibliografía al respecto) a una situación concreta. Por lo que respecta a la influencia de cada parámetro en el proceso: cuando la población de datos de que se dispone es consistente, se han determinado estadísticamente (caso de las reactivaciones); por el contrario, donde esto no es posible debido a la escasez de eventos (caso los nuevos movimientos), se ha realizado una estimación cualitativa basada en observaciones de campo y en el análisis comparado (espacial y temporal), aunque complementado con análisis estadístico de precipitaciones. En este sentido puede decirse que se ha seguido una vía intermedia entre la puramente estadística y la heurística.

Desde el punto de vista de los factores que controlan los movimientos en masa, las consideraciones básicas a tener en cuenta en el Valle del Jerte son las siguientes:

- Durante el Holoceno el régimen tectónico es esencialmente distensivo y ello se manifiesta en algunos fenómenos de subsidencia, si bien menos activos y más localizados que en las etapas precedentes (Carrasco *et al.*, 1991). En lo referente a la sismicidad, según datos del Instituto Geográfico Nacional (Catálogo General de Sismos hasta el día 21 de mayo del año 2000), en el Valle del Jerte únicamente se había registrado un terremoto el día 11 de octubre de 1997 a las 10:54:07 (tiempo universal). El epicentro se localizó en el extremo suroccidental del Valle, en la población de Plasencia, a una profundidad de 2 km, y con Mb= 2.9 en la escala de Ritcher. La intensidad máxima sentida en esta zona es V en la *European Macroseismic Scale* (EMS). De

acuerdo con estos datos, en principio éste es un factor poco relevante en el momento actual y con una incidencia homogénea a lo largo de todo el Valle.

- Las alineaciones orográficas que limitan el Valle (cuerdas divisorias), se estructuran en una serie de niveles que descienden escalonadamente desde los 2200-2300 m (al noreste) hasta los 600-650 m (al suroeste). Sus vertientes definen un graderío, constituido por una sucesión de pequeñas planicies (rellanos u hombreras) y laderas (con desarrollos a veces superiores a 600 m) con pendientes aptas para la ocurrencia de fenómenos en masa.

- La litología es básicamente granitoidea (abundan los granitos biotíticos y de dos micas), con algunos afloramientos de rocas metamórficas distribuidos fundamentalmente al suroeste del valle. En general todas estas rocas están bastante meteorizadas en zonas controladas por la red de fracturas, pero sobre todo las graníticas; en estas bandas las rocas aparecen muy transformadas (materiales fragmentados y descompuestos tipo *grus*) y son las que deben considerarse como potencialmente inestables desde el punto de vista geomecánico.

- El clima es Mediterráneo continentalizado en su variante de montaña, si bien los fuertes contrastes altitudinales condicionan importantes variaciones termométricas y pluviométricas: desde 16ºC y 600 mm de media anual al suroeste a 6ºC y 1800 mm de media anual al noreste. Estas variaciones implican unos regímenes de alimentación nivo-pluvial y pluvio-nival en los principales cursos fluviales. Por otra parte, la localización y orientación geográfica del Valle implican a veces la sucesión muy rápida de borrascas; cuando a un frente frío sigue de inmediato otro templado, puede generarse un deshielo prematuro del manto nival y fuertes crecidas en los cursos torrenciales. Este hecho, junto a las precipitaciones copiosas, es el que parece revelarse como desencadenante de muchos fenómenos gravitacionales.

- Como se ha señalado en diferentes trabajos (ver p.ej.: Flores del Manzano, 1982, 1984), la vegetación natural del Valle del Jerte ha sido modificada por la acción antrópica a lo largo de siglos. Se trata de un proceso continuado de expansión de las tierras de cultivo y pastizales a costa del bosque (roble, castaño, encina). A partir de 1950 y sobre todo de 1970, el cultivo del cerezo se extiende espectacularmente, siendo en el momento actual la principal actividad productiva en el Valle. Todos estos cambios, que aquí resumiremos en el factor "uso del suelo", han podido actuar como desencadenantes de la reactivación de las lenguas de antiguos movimientos en masa y favorecer la ocurrencia de nuevos fenómenos. Hay que tener en cuenta que determinados cultivos arbóreos, como el cerezo, llevan implícitos una serie de infraestructuras viarias y construcción de bancales, que introducen notables variaciones morfológicas e hidrogeológicas en las lenguas y, en casos, pueden modificar el equilibrio dinámico previo. Por otro lado, el cerezo *(Prunus avium)* es un árbol cuya estructura radicular es mucho más superficial que la del castaño *(Castenea sativa)* o el roble *(Quercus pyrenaica)* por lo cual contribuye menos a estabilizar las vertientes; bajo las plantaciones de cerezo las lenguas de los antiguos movimientos en masa están peor drenadas que bajo los bosques de roble y castaño, ya que la evapotranspiración en el primer caso es menor por diferencias ecofisiológicas y de densidad del arbolado.

A partir de estos factores, debidamente combinados y ponderados, se han elaborado los mapas correspondientes. Como ya se ha señalado al describir la problemática del Valle del Jerte, hay dos grupos de procesos activos a considerar: las "posibles reactivaciones" de las lenguas de antiguos movimientos en masa, y la posible ocurrencia de nuevos movimientos en gargantas de torrentes.

El procedimiento utilizado aquí para elaborar la cartografía de susceptibilidades, queda reflejado en los correspondientes diagramas de flujo que precisaremos con algunas anotaciones complementarias; dicho procedimiento se basa en métodos ya aplicados en otras zonas para este tipo de procesos (ver p. ej.: Cendrero *et al.*, 1987; van Westen, 1993; Chacón *et al*, 1994; Chacón e Irigaray, 1999; Carrara et al, 1995; Irigaray *et al.*, 1996).

**Susceptibilidad a la ocurrencia de reactivaciones en antiguas lenguas** (Figura 2)

- *Recopilación y almacenamiento de la información*. Se parte de una cartografía digital (Carrasco 1997, 1999) que contiene el inventario de todos los movimientos en masa previos (figura 3 A) y en los cuales se han detectado signos de movimiento actual (figura 3 B). A partir del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000 se obtiene un Modelo Digital de Elevaciones (figura 3 C), punto de partida para la elaboración de los mapas de pendientes y orientaciones. Finalmente, se realiza un mapa detallado de vegetación actual y usos del suelo, el cual se almacena igualmente en formato digital (figura 3 D).

- *Influencia de los factores implicados en el proceso* (Tabla 1). La "pendiente crítica" a partir de

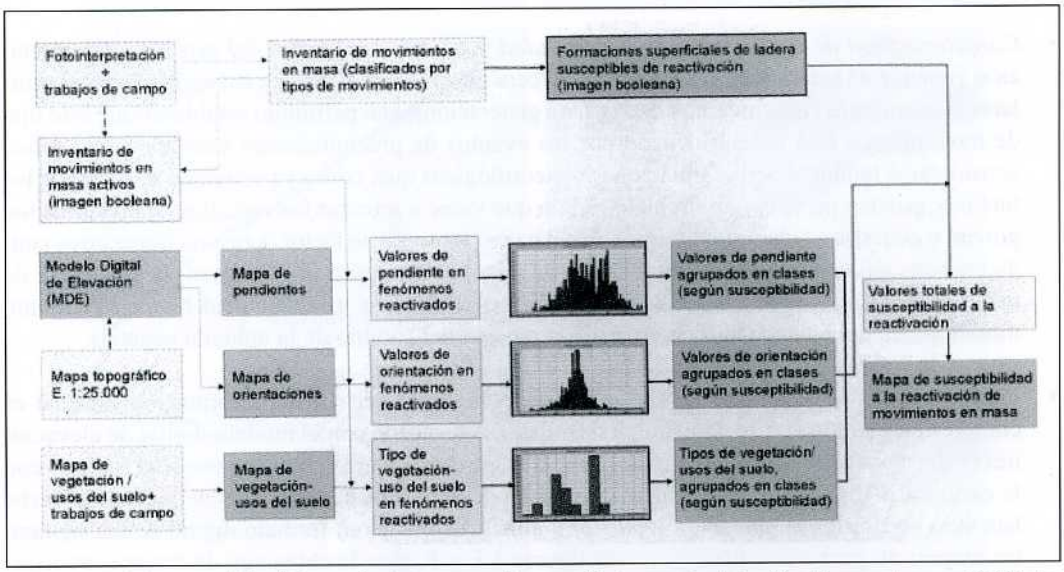



Figura 2. Modelo cartográfico del procedimiento y operaciones realizadas para la obtención del mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de reactivaciones de movimientos en masa (en Carrasco *et al.*, 2000). En línea discontinua se representa la adquisición de la información y su conversión a formato digital; las imágenes en formato "raster" aparecen representadas por rectángulos. Debido al diferente comportamiento de las reactivaciones en cada ladera del valle del Jerte, el modelo que representa la figura ha sido aplicado por separado a cada una de las vertientes del valle.

*Figure 2. Cartographic model of the process and operation performed to make the reactivation susceptibility map (Carrasco et al, 2002). In dotted line is represented the information acquisition and its transformation to digital format; the images in raster format are represented by rectangles. Due to different behaviour of reactivations in each valley hillslope, the model has been applied for each one in an independent way.*

la cual podrían producirse reactivaciones, se ha determinado mediante módulos estadísticos de imágenes, analizando aquellos valores de pendientes que representan píxeles de masas reactivadas. La influencia de la "orientación" se deduce a partir del análisis estadístico general de este factor para los distintos tipos de movimientos en masa y sus valores críticos se obtienen de forma similar al de la pendiente. Los "cambios de usos", se han estructurado en clases que agrupan los distintos tipos de vegetación actual en función de su posibilidad o no de desencadenar el proceso tal como ya se explicó al describir los factores.

- *Integración y resultados.* Dado que el comportamiento de cada vertiente del valle es independiente con respecto a la reactivación de movimientos en masa (verificado a través del test de Mann-Whitney), el modelo ha sido implementado para cada una de las vertientes del valle (ver tabla 1). La concurrencia espacial de valores críticos de pendiente y orientación con zonas sujetas a una modificación importante de la cubierta vegetal (cultivos de cerezo como más significativo), da como resultado aquellas localizaciones en las cuales concurren los mayores condicionantes para la reactivación. Una integración de esos condicionantes con el mapa de lenguas de deslizamientos y avalanchas de los movimientos en masa previos, define las zonas más propicias o críticas para que ocurra la reactivación (figura 4).

**Ocurrencia de nuevos movimientos en masa asociados a la dinámica torrencial: susceptibilidad y peligrosidad** (Figura 5)

- *Caracterización de los factores de inestabilidad.* Los datos obtenidos del estudio e interpretación genética de movimientos en masa de tercera generación (figura 6), así como de otros similares más antiguos (movimientos de segunda generación), han permitido establecer que este tipo de movimientos está desencadenado por los eventos de precipitaciones excepcionales; deben considerarse también ciertas situaciones meteorológicas que, como ya se señaló al describir los factores, pueden provocar un deshielo rápido que viene a reforzar los caudales de precipitación pluvial y genera crecidas en los cursos torrenciales. Junto a este factor deben incluirse otros condicionantes del proceso y responsables de su distribución espacial, como son: la existencia de material movilizable (no consolidado), pendientes adecuadas y la actividad humana (en tanto modificadora del balance hídrico en el suelo a partir del cambio de la cubierta vegetal).

- *Recopilación y almacenamiento de la información.* Gran parte de la información espacial es común a la del modelo previamente desarrollado. Así sucede con el modelo digital de elevaciones (y los mapas derivados del mismo), con el mapa de vegetación actual y usos del suelo, y con la cartografía digital que representa el conjunto de depósitos superficiales de ladera. Además, han sido necesarios la obtención y posterior almacenamiento en formato digital de los siguientes mapas: de fracturas y litológico (ver figuras 3 E y F, para la obtención de zonas meteorizadas), de la red hidrográfica y llanuras aluviales (figura 3G, para la obtención de zonas potencialmente sujetas a crecidas excepcionales), y de vegetación potencial (figura 3H) para determinar el grado de transformación de la vegetación natural (figura 5).

Los datos de precipitación proceden de 8 estaciones meteorológicas localizadas, bien dentro del valle bien en su entorno más inmediato (ver figura 6). La mayor parte de estas estaciones tienen un registro continuo de 15 años y algunas de ellas de 30 años. Las series que abarcan más años son pocas y discontinuas. Con objeto de obtener series más completas mediante correlación, se han uti-

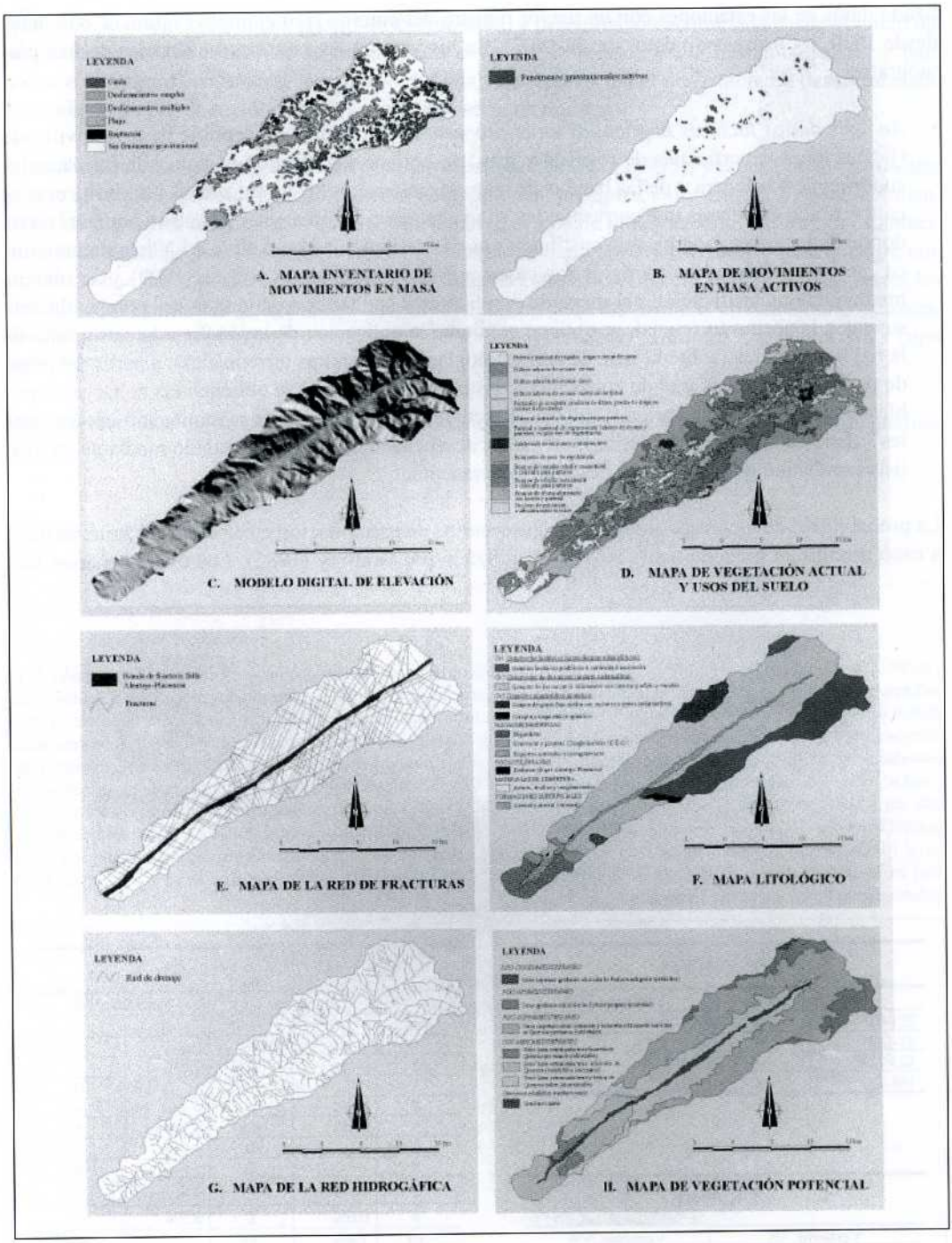



Figura 3. Mapas de partida para la elaboración de los mapas de susceptibilidad a la reactivación y a la ocurrencia de nuevos movimientos en masa.

*Figure 3. Maps of factors to perform the susceptibility maps to reactivations and new slides.*

lizado datos de las estaciones con un mayor registro del entorno (por ejemplo Plasencia, con datos desde 1930, y Cáceres con datos desde 1907). En ninguna de las estaciones utilizadas existen pluviógrafos.

- *Análisis de los factores implicados en el proceso.* El "material" susceptible de ser movilizado (formaciones superficiales de regolito y grus) se obtiene a partir de los mapas de formaciones superficiales de ladera y de las bandas de meteorización. Los "usos del suelo" y su influencia se concretan en dos clases que corresponden a la vegetación arbórea, una, y la otra a aquellas zonas donde dicha vegetación ha sido sustituida por pastizal, matorral y cultivos. La "pendiente crítica" se ha considerado a partir de los casos previos analizados (Carrasco, 1999) y se obtiene mediante la reclasificación del mapa de pendientes. Las "laderas de gargantas" potencialmente sujetas a la acción torrencial, se obtiene mediante la aplicación de un *buffer* a la cartografía de la red hidrográfica (sobre la base de la morfología de las llanuras torrenciales); a partir del mapa de pendientes críticas y el de zonas afectadas por acción fluvial se obtienen las zonas susceptibles al zapamiento por acción torrencial. En cuanto a los "eventos de precipitación excepcionales", dado su carácter bien definido de factor desencadenante, se ha calculado mediante un análisis estadístico que pasamos a describir brevemente.

La probabilidad de recurrencia de distintos escenarios de precipitación en el Valle del Jerte, se llevó a cabo usando un procedimiento similar al utilizado por Godfrey (1985). Los tres escenarios fue-

Tabla 1. Clasificación de los valores de pendiente, orientación y vegetación/usos del suelo en categorías en función de su influencia en la reactivación de movimientos en masa (en Carrasco et al., 2000). Los resultados proceden del análisis estadístico de los histogramas de imágenes (ver Figura 2). 0, sin influencia; + influencia débil; ++ influencia significativa. Para orientación: + media ± desviación estándar; ++ media ± 2 desviación estándar. Para pendiente: + media menos desviación estándar; ++ media menos 2 desviación estándar. Para vegetación / usos del suelo: 0, sin área incluida en movimientos reactivados; + 0 – 5 % del total del área ocupada por el tipo de vegetación está incluido en movimientos de masa activos; ++ más del 5 % del total del área ocupada por el tipo de vegetación está incluido en movimientos de masa activos. CVU, categorías de vegetación/usos del suelo; PA, porcentaje de área. Nótese la influencia de las categorías 8 (cultivo arbóreo de cerezo) y 10 (cultivo arbóreo mixto de cerezo y olivo) en los movimientos activos de la ladera suroeste, y de la categoría 9 (olivar) en la ladera noroeste. El estudio de la influencia del factor vegetación / uso del suelo se llevó a cabo como factor independiente de orientación y pendiente.

ORIENTACIÓN

| Vertiente SE | | Vertiente NW | |
|---|---|---|---|
| 221-91° | 0 | 48-221° | 0 |
| 91-123° | + | 221-268° | + |
| 123-188° | ++ | 268-1.7° | ++ |
| 188-221° | + | 1.7-48° | + |

PENDIENTE

| Vertiente SE | | Vertiente NW | |
|---|---|---|---|
| 0-8.6° | 0 | 1-1.6° | 0 |
| 8.6-14.1° | + | 1.6-6.9° | + |
| >14.1° | ++ | >6.9° | ++ |

VEGETACIÓN / USOS

| | Vertiente SE | | Vertiente NW | |
|---|---|---|---|---|
| VLC | AR | | AR | |
| 1 | 1.8% | + | 0.4% | + |
| 2 | 4.1% | + | 2.2% | + |
| 3 | - | 0 | - | 0 |
| 4 | 4.8% | + | 2.1% | + |
| 5 | 5.1% | ++ | 2.1% | + |
| 6 | - | 0 | 4.9% | + |
| 7 | - | 0 | - | 0 |
| 8 | 6.5% | ++ | 4% | + |
| 9 | 0.6% | 0 | 8.5% | ++ |
| 10 | 7.4% | ++ | - | 0 |
| 11 | - | 0 | - | 0 |
| 12 | - | 0 | 1.6% | + |
| 13 | - | 0 | 0.3% | + |

ron: precipitación en 24 horas, precipitación mensual, y precipitación acumulada desde el inicio del año hidrológico. Este análisis se realizó para eventos "extremos" (caso tipo Jubaguerra) y para eventos "mínimos" o "umbral" (caso tipo Rebollar, que representa el deslizamiento desencadenado por valores de precipitación menores y del cual se tiene registro).

El análisis estadístico está basado en el desarrollado por Mattera (1995), y consta de los siguientes pasos: a) establecimiento de la correlación entre datos de precipitación y altitud; b) establecimiento de las funciones matemáticas que correlacionan los datos de precipitación y altitud; c) establecimiento de series de datos de precipitación "de referencia" para los tres escenarios mencionados, con objeto de que fuera posible referir a ellas los análisis estadísticos; d) calcular para estas series los periodos de recurrencia y las probabilidades de ocurrencia de las distintas circunstancias desencadenantes de los movimientos "extremos" (tipo Jubaguerra) y "mínimos" o "umbrales" (tipo Rebollar).

Para obtener los algoritmos que relacionan los datos de precipitación y altitud se realizaron análisis

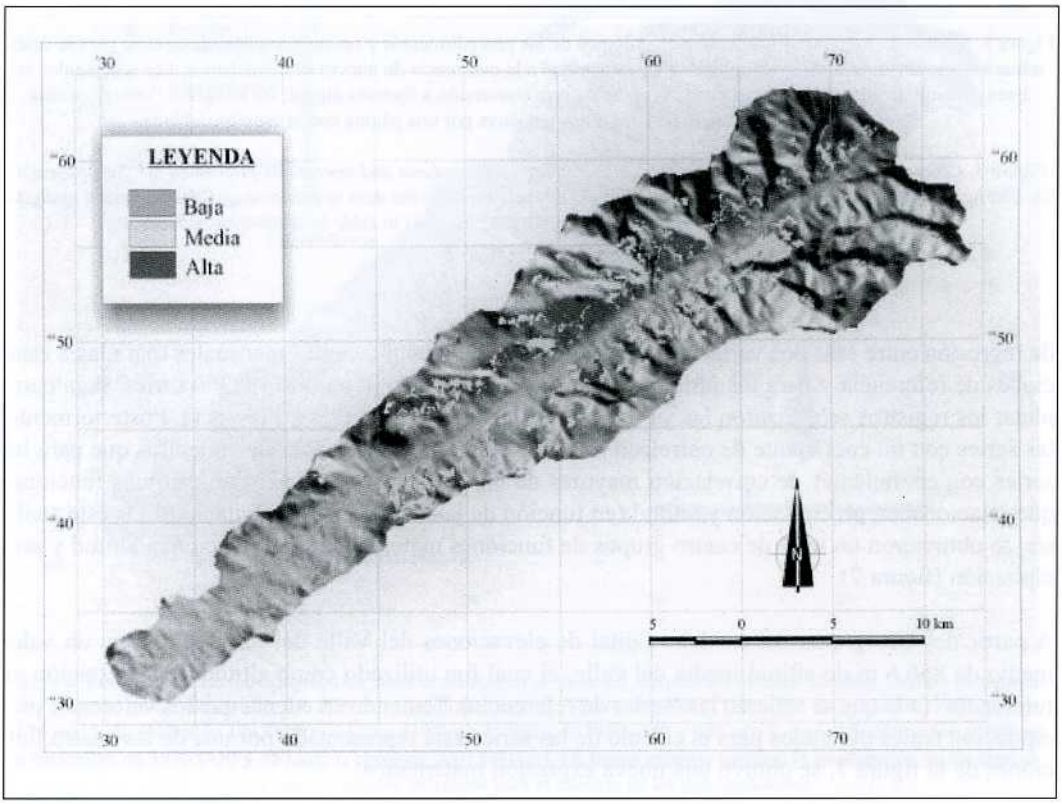



Figura 4. Mapa de susceptibilidad a la reactivación de movimientos de ladera en el Valle del Jerte (resultado del modelo cartográfico de la Figura 2).

*Figure 4. Landslides reactivation susceptibility map in the Jerte Valley (according to cartographic model of Figure 2).*

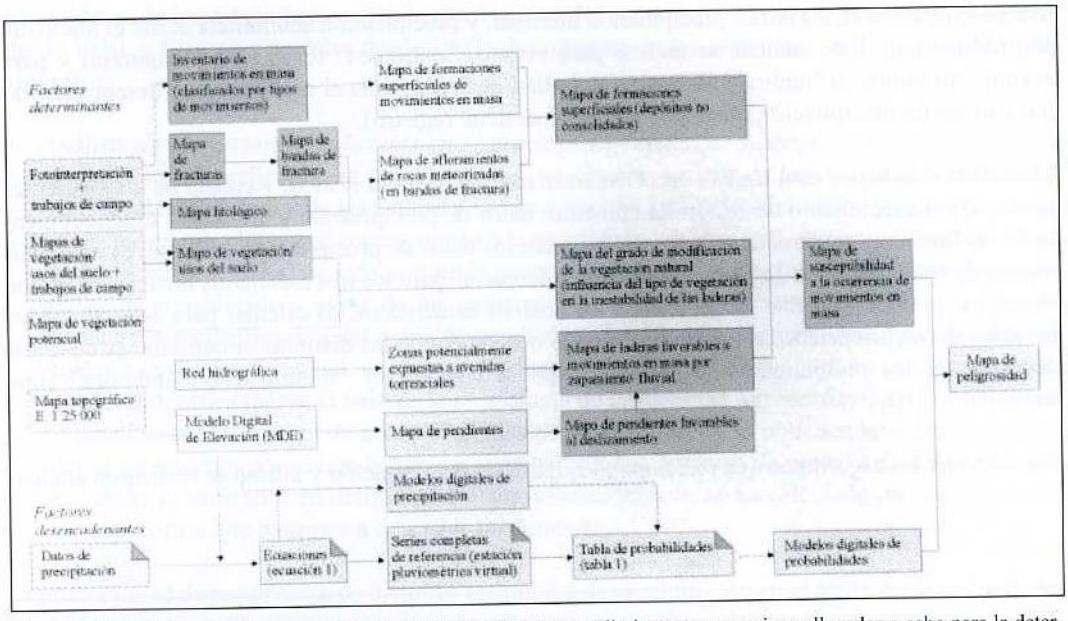



Figura 5. Modelo cartográfico y esquema metodológico de los procedimientos y operaciones llevados a cabo para la determinación y cartografía de la susceptibilidad y peligrosidad a la ocurrencia de nuevos deslizamientos. Los rectángulos en línea discontinua representan la adquisición de datos y su conversión a formato digital; las imágenes "raster" quedan representadas por rectángulos; y los datos tabulares por una página con la esquina doblada.

*Figure 5. Cartographic model and methodological flow-sheet of procedures and operations performed for the susceptibility and hazard mapping of new slides. The rectangles in dotted line show the data acquisition and its conversion to digital format; the raster image are depicted by rectangles; the data in table by a corner bend sheet.*

de regresión entre esas dos variables para cada grupo de precipitaciones mensuales (para las 8 estaciones de referencia y para los últimos 30 años). En total, fueron analizadas 360 series. Para completar los registros se utilizaron las ya referidas estaciones de Cáceres y Plasencia. Posteriormente, las series con un coeficiente de correlación menor de 0,6 fueron desechadas, mientras que para las series con coeficientes de correlación mayores de 0,6 se observó que existían distintas funciones que relacionaban precipitación y altitud (en función de la cantidad de precipitación). De este análisis, se obtuvieron un total de cuatro grupos de funciones matemáticas que relacionan altitud y precipitación (figura 7).

A partir del histograma del modelo digital de elevaciones del Valle del Jerte se obtuvo un valor medio de 866,6 m de altitud media del valle, el cual fue utilizado como altitud de la "estación de referencia" (a la que se refieren las 'series de referencia). Teniendo en cuenta que los valores de precipitación reales utilizados para el cálculo de las series está representado por una de las cuatro funciones de la figura 7, se obtuvo una nueva expresión matemática:

donde: Pv, es la precipitación media en una localización 'problema' dentro del valle; Hv, es la altitud media del valle (866,6 m); $Hs_i$, es la altitud de la localización 'problema'; a es el valor de intersección (una constante, que depende de la cantidad de precipitación); $Ps_i$ , es el valor de precipitación utilizado para calcular las series; y n, es el número de estaciones pluviométricas.

Con esta ecuación, se pueden estimar los valores de precipitación que ocurrieron en la localización en la que tuvo lugar el movimiento de ladera y caracterizar los casos del arroyo Jubaguerra y de Rebollar (tabla 2). A partir de ellos es posible calcular los periodos de recurrencia y las probabilidades de ocurrencia (tabla 3) para ambos escenarios: "extremo" (Jubaguerra) y "umbral" (Rebollar).

- *Integración y resultados.* La integración de parámetros y la cartografía correspondiente obteni-

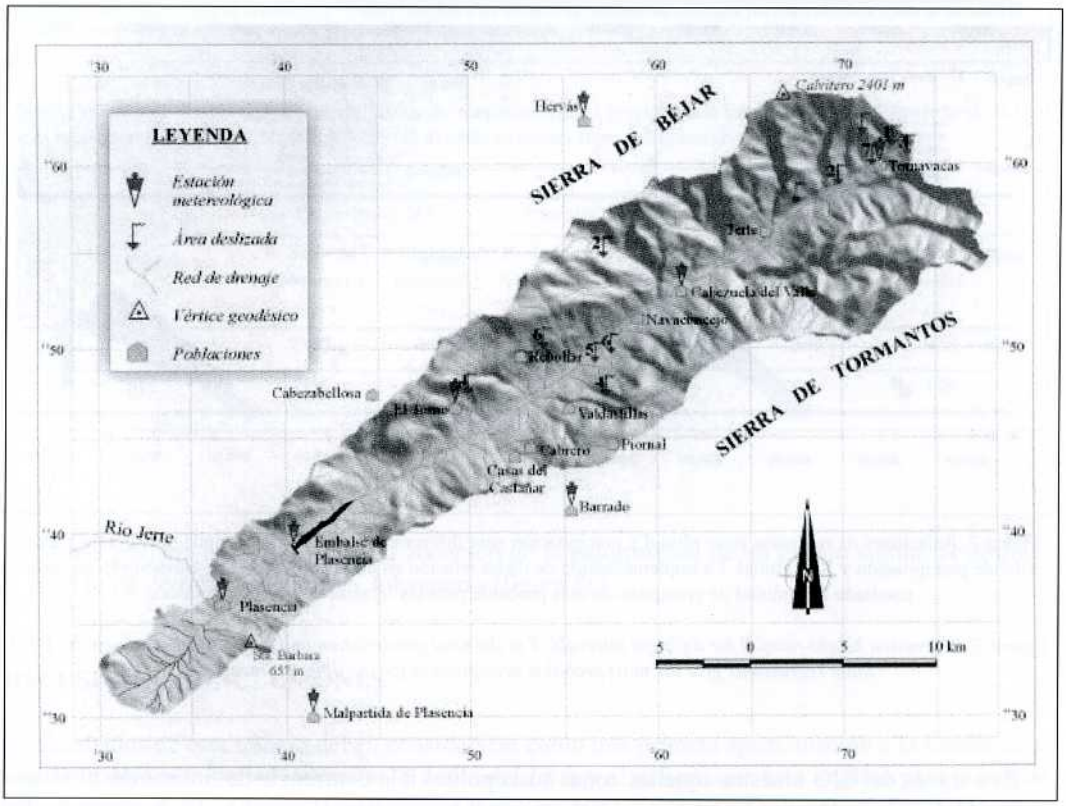



Figura 6. Localización de movimientos en masa ocurridos en el Valle del Jerte en los últimos 20 años. Tiempo de ocurrencia y altitud de los escarpes de las diferentes localizaciones: 1, febrero de 1986 (1180 m); 2, diciembre de 1994 (980 y 1175 m); 3, diciembre de 1995 (1060, 1120 y 1140 m); 4, enero de 1996 (750 y 890 m); 5, marzo de 1996 (450 y 500 m); 6, diciembre de 1996 (450 y 750 m); 7, enero de 2001 (880 m). La figura muestra también la localización de las estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis de las precipitaciones.

*Figure 6. Landslides happened in the Jerte Valley during the last 20 years. Date and scars heigh: 1, 02/1986 (1180 m); 2, 12/1994 (980 and 1175 m); 3, 12/1995 (1060, 1120 and 1140 m); 4, 01/1996 (750 and 890 m); 5, 03/1996 (450 and 500 m); 6, 12/1996 (450 and 750 m); 7, 01/2001 (880 m). The location of meteorological stations used to analyse rainfall is also shown.*

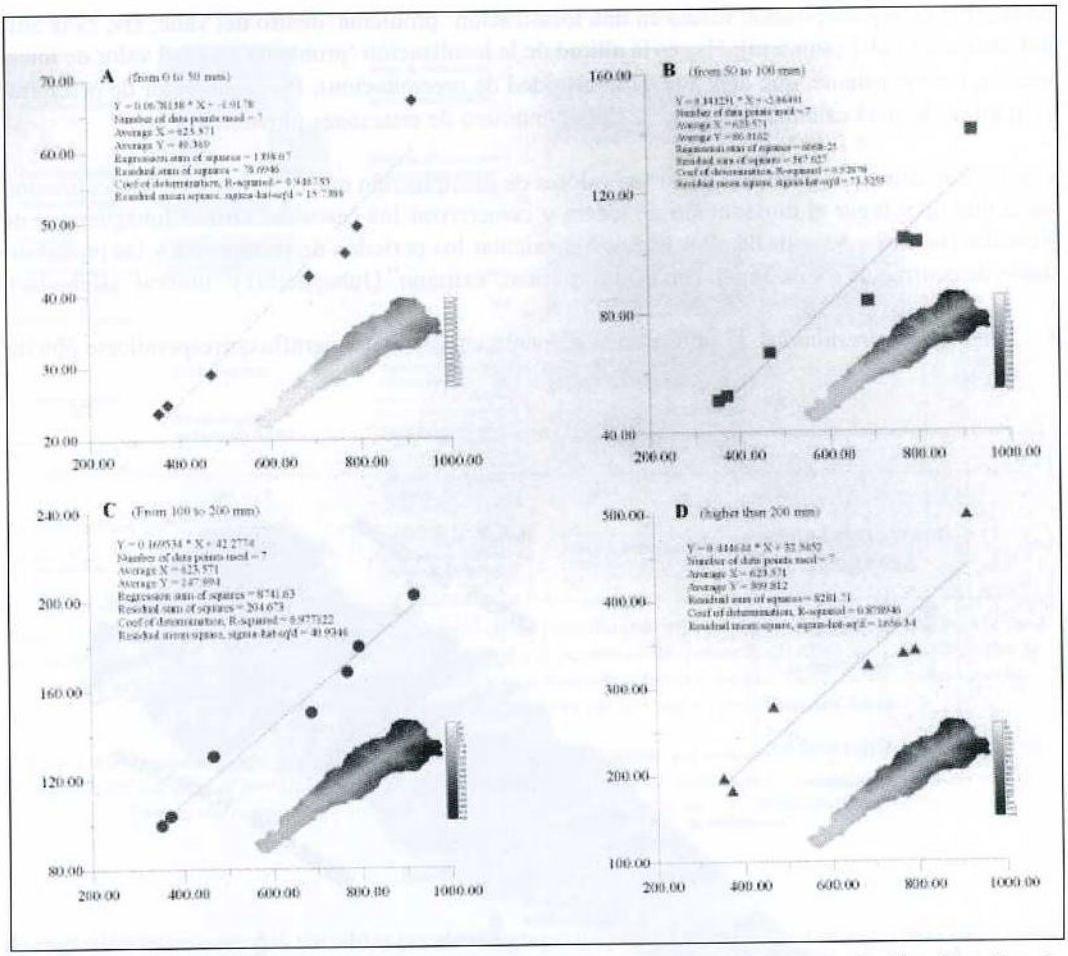



Figura 7. Relaciones de regresión entre altitud y precipitación para diferentes intervalos de precipitación, donde Y es el total de precipitación y X la altitud. La implementación de dicha relación en el modelo digital de elevaciones da como resultado la cantidad de precipitación más probable para las localizaciones seleccionadas.

*Figure 7. Regression height-rainfall for different intervals. Y is the total precipitation and X the heigh. Through the DTM these regressions give the most probable precipitation for the different locations.*

da a través del SIG muestra aquellas zonas susceptibles a la ocurrencia de futuros deslizamientos de derrubios desencadenados por precipitaciones torrenciales (figura 8a). La implementación en los modelos digitales de precipitación de las probabilidades de ocurrencia de cada una de las tres "condiciones" de precipitación que se suponen implicadas en el desencadenamiento de nuevos deslizamientos con alta peligrosidad y potencial catastrófico (precipitación en 24 horas, precipitación mensual y precipitación acumulada de otoño e invierno; ver tabla 2), dan como resultado una representación espacial de probabilidades (modelos digitales de probabilidades). Si asumimos que las tres "condiciones deben concurrir para que se produzca el evento, entonces la probabilidad sería el producto de las tres probabilidades parciales (figura 8b). La doble condición de zonas susceptibles y probabilidad de ocurrencia para cada una de ellas da como resulta-

Tabla 2. Datos de precipitación que caracterizaron la ocurrencia de: a) valor mínimo a partir del cual ha sido registrado un "nuevo evento" (Rebollar); b) evento con consecuencias catastróficas potenciales (Jubaguerra).

| Eventos | Localización y altitud | Prec. Máx. en 24 h | Registros de precipitación anteriores a la ocurrencia del movimiento desde el comienzo del año hidrológico | | | | | Precip. mensual | Precipitación acumulada |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (a) Mínimo o umbral | Rebollar, | | SEPT | OCT | NOV | | | DIC | |
| | (*) 450 m | 35.36 | 40.18 | 41.96 | 90.36 | | | 278.66 | 451.16 |
| | (**) 866.6 m | 94.07 | 98.92 | 112.37 | 160.77 | | | 464.05 | 836.13 |
| ( b) Evento extremo | Arroyo Jubaguerra | | SEPT | OCT | NOV | DIC | | ENE+1 | |
| | (*) 890 m | 144.52 | 96.62 | 96.95 | 223.03 | 406.61 | | 638.06 | 1,461.27 |
| | (**) 866.6 m | 134.52 | 92.92 | 93.65 | 212.62 | 396.2 | | 627.65 | 1,423.08 |

(*) datos referidos al lugar de ocurrencia; (**) datos referidos a las series de la "estación de referencia"; en subrayado, datos a partir de los cuales se han calculado los periodos de recurrencia y las probabilidades de ocurrencia.

Tabla 3. Periodos de recurrencia y probabilidades de ocurrencia de: a) precipitación mínima o "umbral" a partir de la cual se han registrado movimientos (tipo Rebollar); b) eventos extremos (tipo Jubaguerra).

| Eventos | Precipitación 24 h | | Precipitación mensual | | Precipitación acumulada | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *Periodo de recurrencia (en meses)* | *Probabilidad mensual (%)* | *Periodo de recurrencia (en meses)* | *Probabilidad mensual (%)* | *Periodo de recurrencia (en años)* | *Probabilidad anual (%)* |
| a) | 23.77 | 4.21 | 159.57 | 0.63 | 10.44 | 9.58 |
| b) | 1116 | 0.09 | 1117 | 0.09 | 94 | 1.06 |

do una primera aproximación a la zonación de la peligrosidad de un evento similar al deslizamiento de derrubios del arroyo Jubaguerra (figura 8c).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo deben considerarse como una primera aproximación a la caracterización de la dinámica de las laderas en el Valle del Jerte y al peligro que ésta implica para la actividad antrópica. Aunque dichos resultados se basen en la experiencia adquirida a lo largo de varios años de investigación, sería preciso validar el modelo para establecer su grado de fiabilidad; por ello, entendemos que la vía más completa es la monitorización de un área determinada y suficientemente representativa. Se trata de determinar el grado de concordancia entre los supuestos establecidos en la cartografía y los fenómenos acaecidos en el territorio utilizando para ello determinadas técnicas (perfiles geofísicos, seguimiento de trazadores y testigos mediante GPS, levantamientos topográficos de detalle, uso de extensiómetros e inclinómetros, etc.) e indicadores (grietas en el terreno, en edificaciones, etc; anomalías en la vegetación; presencia de movimientos secundarios; y en general cualquier tipo de modificación micromorfológica). En este sentido, hemos

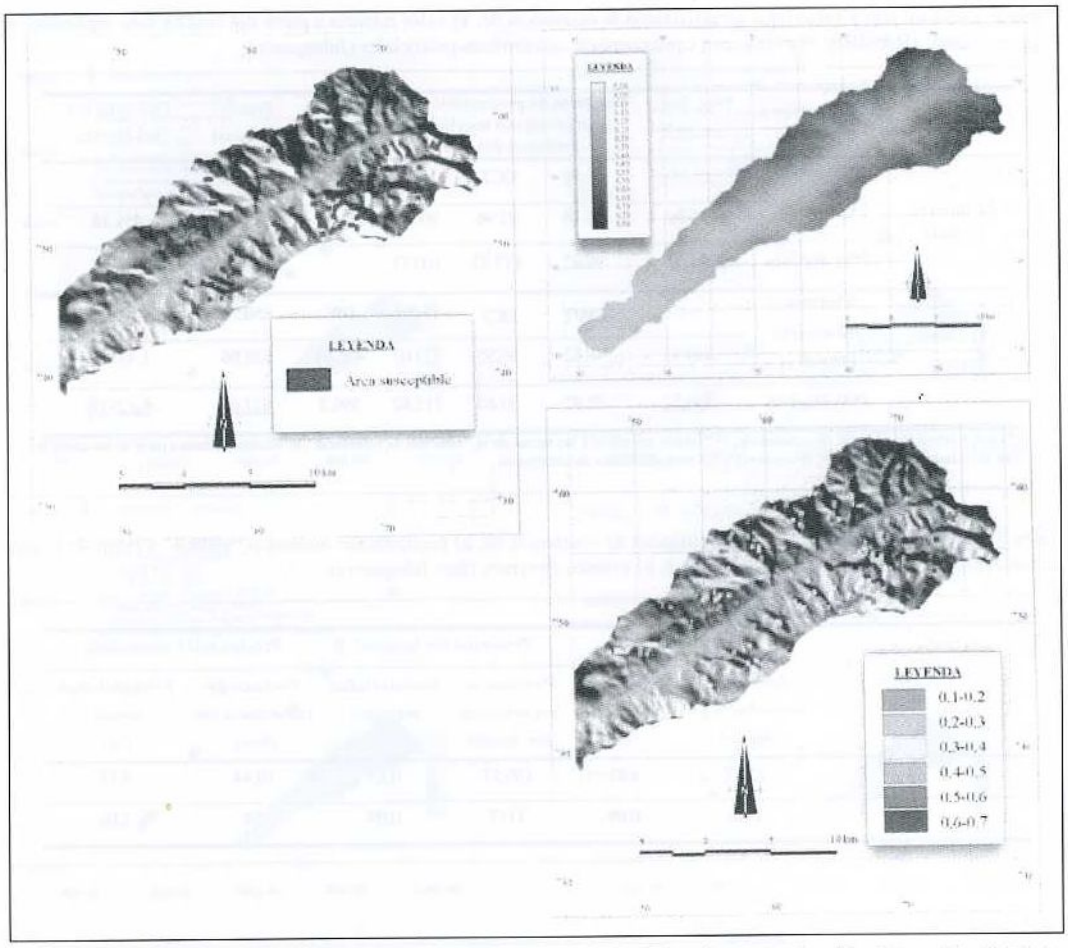



Figura 8. Resultado final: a) mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos de derrubios; b) modelo digital de probabilidad condicionada; c) mapa de peligrosidad.

*Figure 8. The final result: a) susceptibility map of debris slides happening; b) digital model of conditioned probability; c) hazard map.*

de señalar que algunos fenómenos observados que apoyan las conclusiones obtenidas en otros trabajos similares y previos a éste; nos referimos concretamente al evento ocurrido recientemente en la localidad de Tornavacas (ver foto 2), también a la actividad actual en las laderas del arroyo de Jubaguerra, así como a los numerosos signos registrados tras cada periodo de precipitación continua en determinadas lenguas (pequeños deslizamientos, caídas, reptaciones, etc.); es igualmente constatable la presencia de efectos en ciertas edificaciones en algunas localidades que, al menos en parte, están ubicadas sobre depósitos de antiguos movimientos en masa.

De acuerdo con lo anterior, sí puede decirse que los datos obtenidos hasta el momento son lo suficientemente fiables como para ser considerados en una propuesta para la delimitación de áreas restrictivas en lo referente a la planificación de cultivos e infraestructuras. Por otra parte, la utilidad de

todos estos datos es importante tanto para investigaciones futuras acerca de la dinámica de los procesos activos como para cualquier tipo de inventario sobre Riesgos Naturales en esta Comarca.

De los resultados del análisis estadístico (tabla 3), se deduce que la probabilidad de ocurrencia de un registro de precipitación con potencialidad para desencadenar nuevos deslizamientos puede considerarse moderada; los registros de precipitación en 24 horas, mensual y acumulada de otoño-invierno, para el evento de Jubaguerra, han sido en cada caso los más elevados de todo el siglo XX para el Valle del Jerte.

Frente a lo anterior, puede considerarse con cierta fiabilidad que precipitaciones en 24 h próximas o superiores a 100 mm, seguidos de varias semanas de intensas lluvias o nevadas, son potencialmente desencadenantes de deslizamientos por zapamiento torrencial. En este sentido y como se ha descrito ya en otras zonas (Garland y Olivier, 1993), parece claro que la existencia de precipitaciones continuas previas juegan un papel importante en la pérdida de estabilidad de las laderas; la situación es aún más crítica cuando los depósitos que constituyen las formaciones superficiales de las laderas, resultan "zapados" en su base por crecidas torrenciales.

Dado que las probabilidades calculadas son fuertemente dependientes de los registros de precipitaciones, estos resultados, al igual que en otros casos, deberán ser tomados con precaución.

## BIBLIOGRAFÍA


Alexander, D. and Formichi, R. 1993. Tectonic causes of landslides. Earth surface Processes and Landforms,18, 311-338.

Ayala-Carcedo, F.J y Andreu, J. (eds.). 1987. *Manual de Taludes*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 456 pp.

Ayala-Carcedo, F.J. 1995. Probabilidad y vulnerabilidad en movimientos de ladera. En *Reducción de Riesgos Geológicos en España*, ITGE y R. Acad. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 95-113.

Brabb, E.E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping. Procced. IV Int. Symp. Landslides, Toronto, V.1, 307-324.

Brunsden, D. 1973. The application of systems theory to the study of mass movement. *Geologica Applicata e Hidrogeologia*, Univ. of Bari, 8, 1,185-207.

Burrough, P.A. 1996. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Clarendon Press, Oxford, 194 pp .

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. 1995. GIS Technology in mapping landslides hazards. En: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston and London, 135-175.

Carrara, A.; Cardinali, F. And Reicenbach, P. 1995. GIS Technology in mapping Landslide Hazard. In A. Carrarra and F. Guzzeti (eds.), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Kluwer Academic Publishers, London, 135-176.

Carrasco, R.M. 1997. *Estudio geomorfológico del Valle del Jerte (Sistema Central español): secuencia de procesos y dinámica morfogenética actual*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid, 343 pp.

Carrasco, R.M. 1999. *Geomorfología del Valle del Jerte. Las líneas maestras del paisaje*. Univ. de Extremadura (UEX), Cáceres, 246 pp.

Carrasco, R.M. y Pedraza, J. 1992. Fenómenos gravitacionales en el Valle del Jerte: tipologías y significado morfológico En: López-Bermúdez, F. *et al.* (eds.), *Estudios de Geomorfología de España.* Sociedad Española de Geomorfología (SEG), Murcia, 435-444.

Carrasco, R.M., Pedraza, J. y Rubio, J.C. 1991. Actividad neotectónica cuaternaria en el Valle del Jerte. *Cuaternario y Geomorfología*, 5(1-4), 15-25.

Carrasco, R.M., Pedraza, J., Martín-Duque, J.F, Mattera, M., y Sanz, M.A. 2000. Landslide susceptibility zoning for risk analysis using a geographical information system (GIS) in the Jerte Valley (Spanish Central System). En: Brebbia, C.A. (ed.), *Risk Analysis II.* WIT press, Southampton-Boston, 329-344.

Cendrero, A.; Díaz de Terán, J.R.; Fernández, O. *et al.* 1987. Detailed geomorphological hazard mapping for urban and rural planning in Vizcaya (Northern Spain). In F.C. Wolf (ed.), *Geology for environmental planning.* Geological Survey of Norway, Special Publ. 2, Trondheim, 25-41.

Chacón, J. e Irigaray, C. 1999. Previsión espacial de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante SIG. En L. Laín (ed.), *Los sistemas de información geográfica en los riesgos naturales y el medio ambiente.* ITGE-Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 113-123.

Chacón, J.; Irigaray, C. and Fernández, T. 1994. Large to middle scale landslides inventory, analysis and mapping with modelling and assessment of derived susceptibility, hazard and risks in a GIS., *7ª International IAEG Congress, Lisboa*, Balkerna, Rotterdam, VI, 4669-4678.

Corominas, J. 1988. Mapas de peligrosidad de movimientos de ladera. En F.J. Ayala, J.J. Durán y T. Peinado (eds.), *Riesgos Geológicos.* IGME, Madrid, 193-201.

Corominas, J. y García Yagüe, A. 1997. Terminología de los movimientos de ladera. *IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables*, Granada, 1051-1072.

Corominas, J., Remondo, J., Farias, P. *et al.* 1996. Debris Flow. In R. Dikau et al. (eds.), Landslides Recognition. Identification and Causes, Wiley, Chichester, 161-180.

Cottecchia, V. 1978. Systematic reconnaissance mapping and registration of slope movements. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 17, 5-37.

Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. and Ibsen M.L. (eds.). 1996. Landslide recognition. John Wiley & Sons, N. York, 251 pp.

Ferrer, M. 1995. Los movimientos de ladera en España. En *Reducción de Riesgos Geológicos en España,* ITGE y R. Acad. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 69-82.

Flageollet, J.C. 1994. Final remarks. In R. Casale, r. Fantechi and J.C. Flageollet (eds.), *Temporal occurrence and forecastin of landslides in the European Community.* European Commission, Brussels, EUR 15805 EN, 935-941.

Flores del Manzano, F. 1982. *Aproximación a la Historia del Valle del Jerte (1). La Villa de Cabezuela.* Institución cultural "El Brocense", Cáceres, 206 pp.

Flores del Manzano, F. 1984. Hacia una Historia de la Alta Extremadura. El Valle del Jerte II. Sanguino-Offset, Plasencia, 227 pp.

Garland, G.G. and Olivier, M.J. 1993. Predicting landslides from rainfall in a humid, subtropical region. *Geomorphology,* 8, 165-173.

Giani, G.P. 1992. *Rock Slope Stability Analysis.* Balkema, Rotterdam, 361 pp.

Godfrey, A.E. 1985. Prediction and Protection for Slope Hazards: Utah's Landslides of 1983 as a magnitude-frequency event with a finite return probability. En: Bowles, D.S. (ed), *Delineation of Landslide, flash flood, and debris flow hazards in Utah.* Utah Water Research Laboratory-Utah State University, Logan, 67-85.

González-Díez, A. 1995. *Cartografía de movimientos de ladera y su aplicación al análisis del desarrollo temporal de los mismos y de la evolución del paisaje.* Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Inédita, 415 pp.

Goy, J.L. y Zazo, C. 1987. Cuaternario y Geomorfología. En *Mapa Geológico de España. E. 1:50.000, nº 558, Plasencia*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 23-25 y 35-36.

IGN. 2000. *Catálogo General de Sismos*, Instituto Geográfico Nacional: Madrid.

Irigaray, C. y Chacón, J. 1991. Los movimientos de ladera en el sector de Colmenar (Málaga). *Rev. Soc. Geol. España*, 4, 3-4, 203-214.

Irigaray, C.; Fernández, T. and Chacón, J. 1996. Comparative analysis of methods for landslide susceptibility mapping. In J. Chacón, C. Irigaray, and T. Fernández (eds.), *Landslides*. Balkema, Rotterdam, 373-384.

MAGNA. 1981 a 1991. *Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000* (Conjunto de hojas correspondientes al Sistema Central). Instituto Geológico y Minero de España.

Maguire, D.J., Goodchild, M.F. & Rhind, D.W. 1991. *Geographical Information Systems*. Longman Scientific & Technical, Essex, V1, 447 pp. and V2 649 pp.

Mattera, M. 1995. *Valutazione del Rischio Vulcanico Nell'isola D'Ischia, Tesi di Laurea, Facolta Di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali*. Universita Federico II, Napoli, 128 pp.

Pascolo, P. & Brebbia, C.A. (eds).1998. *GIS technologies and their environmental applications*. WIT Press, Southampton and Boston.

Pierson, T.C. and Costa, J.E. 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. In J.E. Costa and G. Wieczorec (eds.), *Debris Flows/Avalanches: Processes, Recognition, and Mitigation*, The Geological Society of America, Boulder, Colorado, 1-12.

Unesco. 1972. *Report of consultive meeting of experts on the statistical study of natural hazards and their consequences*. Document SC/WS/500, Unesco: Paris.

Unesco Working Party on World Landslide Inventory. 1993. A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 47, 53-57.

van Westen, C.J. 1993. *Application of Geographical Information System to Landslide and Zonation*. ITC. Publication Number 15, Enschede, The Netherlands.

Varnes, D.J. 1978. Slope movements: types and processes. In R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.), *Landslides: analysis and control*. Special Report 176. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 11-33.

Varnes, D.J., & Commission on Landslides and Other Mass-Movements on Slopes-IAEG. 1984. *Landslides hazard zonation: a review of principles and practice*, Natural Hazards, 3, Unesco: Paris, 62 pp.

WP/WPI (International Geotechnical Societies" UNESCO working Party on World Landslide Inventory). 1993. A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin of the Association of Engineering Geology, 47, 53-57.