

# Metodologías de análisis de riesgos en inestabilidad de laderas (Estado del arte)

## Methodologies for risk analysis in slope instability

Marta Bernabeu García<sup>1\*</sup> y Juan Antonio Díez Torres<sup>2</sup>

### Palabras clave

riesgo;  
ladera;  
mapa;  
susceptibilidad;  
deslizamiento;

### Sumario

Este trabajo es una aproximación a las distintas metodologías utilizadas en la realización de mapas de riesgo de deslizamiento de laderas de tal manera que el lector pueda obtener un conocimiento básico acerca de cómo se procede en su elaboración.

Los mapas de riesgo de deslizamientos son cada vez más demandados por las administraciones públicas. Esto se debe a que a causa del cambio climático, la deforestación y la presión ejercida por el crecimiento de los núcleos urbanos, cada año son mayores los daños producidos por los fenómenos naturales, haciendo de este área de trabajo un campo de estudio con creciente importancia.

Para explicar el proceso de mapeo se realiza un recorrido por cada una de las fases de las que éste se compone: desde el estudio de los tipos de movimientos de laderas y el necesario manejo de los sistemas de información geográfica (SIG), a los inventarios de deslizamientos y los análisis de la susceptibilidad, la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo.

### Keywords

risk;  
slope;  
map;  
susceptibility;  
landslide;

### Abstract

*This paper is an approach to the different methodologies used in conducting landslide risk maps so that the reader can get a basic knowledge about how to proceed in its development.*

*The landslide hazard maps are increasingly demanded by governments. This is because due to climate change, deforestation and the pressure exerted by the growth of urban centers, damage caused by natural phenomena is increasing each year, making this area of work a field of study with increasing importance.*

*To explain the process of mapping a journey through each of the phases of which it is composed is made: from the study of the types of slope movements and the necessary management of geographic information systems (GIS), inventories and landslide susceptibility analysis, threat, vulnerability and risk.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión del riesgo es una técnica que se aplica en multitud de áreas de estudio diferentes. En el caso de los fenómenos naturales, como inundaciones, terremotos o deslizamientos de laderas pretende conocer su comportamiento antes de que se produzcan.

Un buen número de autores han dedicado sus esfuerzos a encontrar metodologías y crear modelos que permitan, de alguna manera, predecir el comportamiento de los fenómenos naturales y el modo en el que afectarán a la zona donde se producen. Este, es el caso del análisis de riesgos de deslizamientos de laderas, al que se dedica este trabajo.

Se trata de un proceso complejo y lleno de incertidumbres, cuya meta es la creación de un mapa que muestre las áreas sujetas a mayores peligros, de tal manera, que se puedan tomar las pertinentes medidas de protección antes de que suceda el deslizamiento.

## 2. OBJETO Y NECESIDAD DE LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE RIESGOS

El desarrollo de procedimientos para evaluar la amenaza y riesgo por deslizamientos se produjo a partir de principios de la década de los setenta, con la denominada cartografía ZERMOS (Zona Expuesta a los Riesgos de los Movimientos del Suelo) (Leroi 1996) y con la clasificación de deslizamientos realizada en esa época por Varnes (1978).

Por regla general, la mayoría de los movimientos de ladera suceden en zonas de difícil acceso y poco pobladas, pero en las ocasiones en las que se producen entorno a núcleos urbanos sus efectos son catastróficos.

Ejemplos de ello se encuentran en todo el mundo. El deslizamiento producido en Leyte del Sur (Filipinas) en 2006 produjo la muerte de doscientas personas.

En agosto de 2010 el movimiento de tierras ocurrido en Zhouqu (China), dejó mil quinientos muertos y más de doscientos heridos además de innumerables pérdidas económicas (figura 1).

Los deslizamientos se encuentran asociados, en muchas ocasiones, a los sismos y a las grandes concentraciones de precipitaciones, siendo en estos casos, los causantes de gran parte de los daños. En la figura 2 se observa el

\* Corresponding author: martiber@gmail.com

<sup>1</sup> Pilotes Terratest S. A. Las Condes, Santiago, Chile.

<sup>2</sup> Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), Madrid, España.

efecto de los deslizamientos ocurridos tras el terremoto de Redcliffs; Nueva Zelanda en 2011.



**Figura 1.** Deslizamiento de Zhouqu, China (2010).



**Figura 2.** Urbanización de lujo afectada por deslizamientos después del terremoto de Redcliffs, Nueva Zelanda (2011).

En países como Japón o Italia, las pérdidas estimadas por esta causa superan los 2.000 millones de dólares anuales y los 1.300 en Estados Unidos. Según la UNESCO, entre 200 y 300 muertos al año son atribuibles directamente a deslizamientos en el mundo, sin considerar los movimientos de tierra causados por los terremotos.

En España, los movimientos de ladera son los procesos geodinámicos que se presentan con mayor frecuencia y extensión y las pérdidas que ocasionan, unos 150 millones de euros anuales son también las mayores, sólo por detrás de las inundaciones. El mayor número de víctimas ocurrido en nuestro país por esta causa fue de casi 100 muertos. Tuvo lugar en Azagra, Navarra, en 1874 como consecuencia del desplome de un talud de yesos que sepultó parte del pueblo.

### 3. TIPOS DE MOVIMIENTOS DE LADERA

La variedad de fenómenos incluidos como movimientos de ladera es grande y su clasificación es compleja. Algunos

autores (Varnes 1978; Cruden y Varnes 1996; Corominas y Yagüe 1997) los clasifican según el tipo de movimiento y la naturaleza de los materiales inestabilizados (tabla 1).

El tipo de movimiento se refiere a los mecanismos internos de desplazamiento de la masa inestabilizada. Los tipos de mecanismos principales son la caída o desprendimiento, el vuelco, el deslizamiento, la expansión lateral y los flujos. También puede existir una combinación de varios tipos de mecanismos, son lo que se conoce como “movimientos complejos”. Algunos ejemplos se muestran en las figuras 3, 4, 5, y 6.



**Figura 3.** Desprendimientos de rocas en Argentina, (2012).



**Figura 4.** Deslizamiento rotacional de Holbeck, Reino Unido. (1993).



**Figura 5.** Corrimiento de tierras en Guatemala (2010).

**Tabla 1.** Clasificación de movimientos de ladera. Modificada de Varnes (1978)

Tipo movimiento	Tipo material	
	Roca	Suelo
Desprendimientos	Desprendimientos de rocas	Desprendimientos de suelos
Vuelcos	Vuelcos de rocas	Vuelcos de suelos
Deslizamientos	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de suelos
Traslacionales		
Rotacionales		
Expansión lateral	Expansión lateral de bloques	Expansión lateral de suelos
Flujos	Flujos de derrubios	Flujos de lodos
Deslizamientos complejos	Combinación de materiales	



**Figura 6.** Deslizamiento complejo en la provincia de Gansu (China), con desprendimiento de rocas y suelos (2012).

#### 4. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

A pesar de que muchos autores han realizado aportaciones e incluyen pequeñas variaciones en la definición de algunos de los términos utilizados en el manejo de los riesgos naturales, son las recogidas por el Centro de Coordinación de Gestión de Desastres de Naciones Unidas (UNDRO), en 1984, las más utilizadas.

- **Amenaza, peligro o peligrosidad natural (P):** probabilidad de que ocurra un fenómeno determinado potencialmente destructivo en un periodo de tiempo específico y en una región determinada.
- **Vulnerabilidad (V):** grado de pérdidas experimentadas por un elemento o conjunto de elementos territoriales como resultado de un proceso natural de magnitud determinada. Se expresa en una escala que va desde 0, no hay daños, a 1, que supone la pérdida total.
- **Riesgo específico (R<sub>s</sub>):** es el grado esperado de pérdidas derivadas del evento natural destructivo. Se expresa como el producto de la amenaza por la vulnerabilidad del elemento expuesto, en forma de probabilidad.

$$R_s = P \times V$$

- **Elementos en riesgo (E):** la población, los edificios, y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y las infraestructuras expuestas a los efectos del evento destructivo. De tal manera que:

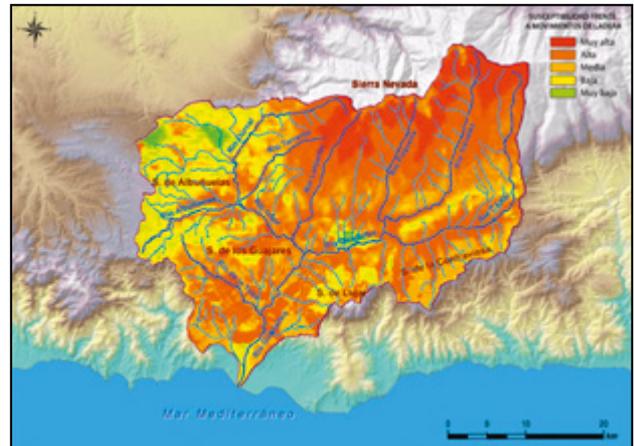
$$E_t = \Sigma(E_p + E_e + \dots + E_i)$$

Siendo E<sub>t</sub> la combinación total de todos los elementos considerados.

- **Riesgo total (R<sub>t</sub>):** es el número de pérdidas de vidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica derivadas del evento natural destructivo. Se expresa como el producto del riesgo específico, R<sub>s</sub>, y los elementos en riesgo, E.

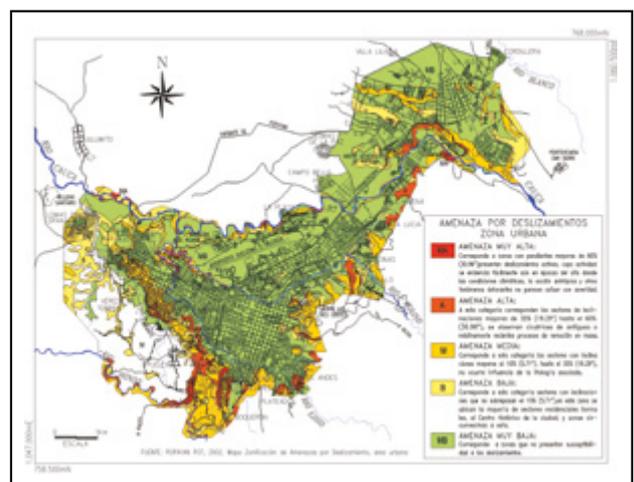
$$R_t = \Sigma(E \times R_s) = \Sigma(E \times P \times V)$$

- **Mapas de susceptibilidad:** muestran la probabilidad de que se produzca un deslizamiento en un área dada (figura 7). No tienen en cuenta ni la magnitud del deslizamiento ni la probabilidad temporal de que se produzca. Recogen, por tanto, en términos matemáticos la posibilidad espacial de ocurrencia del movimiento de una ladera en unas condiciones dadas del terreno.



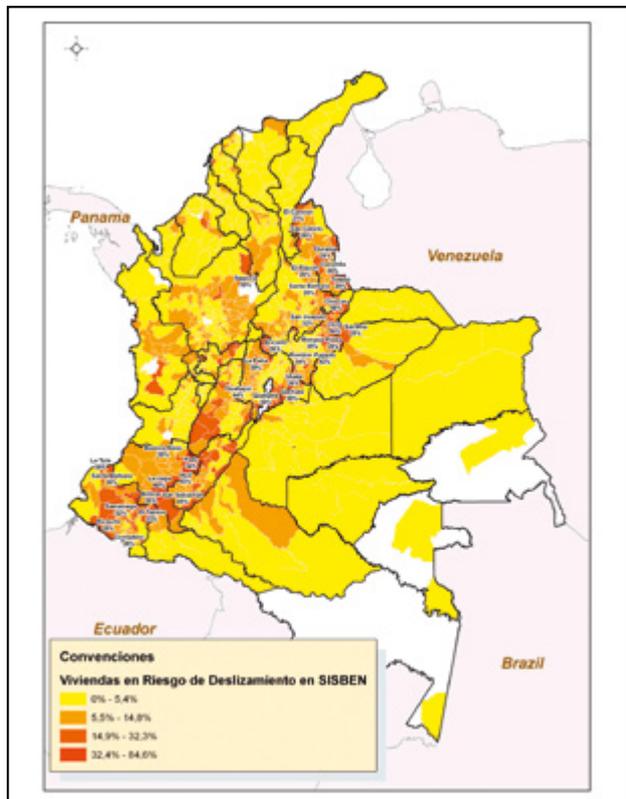
**Figura 7.** Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera de Sierra Nevada, Granada (tomado de www.ugr.es).

- **Mapas de amenaza:** a diferencia de los anteriores, éstos recogen la probabilidad de que un deslizamiento de una magnitud dada ocurra en un periodo de tiempo determinado en un área dada. Implica, por tanto, conocer el cuándo, dónde, cómo y las dimensiones del deslizamiento. La susceptibilidad es por tanto un componente de la amenaza (figura 8).



**Figura 8.** Mapa de amenaza de deslizamiento en el área urbana de Popacayán, Colombia (tomado de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de la República de Colombia, 2002).

- **Mapas de riesgo:** son el resultado de la unión de todos los conceptos definidos con anterioridad (figura 9). El mapeo del riesgo es un problema multidisciplinario que se compone de los siguientes elementos: mapa de amenaza, elementos en riesgo, valoración de costos, vulnerabilidad y evaluación de riesgos.



**Figura 9.** Mapa de riesgo específico de afectación a viviendas por deslizamiento de laderas en Colombia (tomado de OCHA Colombia).

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** son un instrumento imprescindible en la elaboración de mapas de riesgos. La razón fundamental para la utilización de un SIG es la gestión de información espacial en diferentes capas temáticas almacenadas de forma independiente. Es una herramienta ideal para la zonificación de deslizamientos por su capacidad de procesos de imágenes, tales como aerofotografías escaneadas o imágenes de satélite.

## 5. ESTUDIO DEL RIESGO DE DESLIZAMIENTO DE UNA LADERA

El proceso de investigación de riesgos de inestabilidad de laderas comprende las siguientes fases, (Bonnard, 2008):

- Identificación del peligro: determinación de las características del deslizamiento.
- Análisis de la amenaza: cualificación del fenómeno de acuerdo a distintos escenarios.
- Análisis de consecuencias: determinación del impacto sobre los elementos expuestos considerando su valor y las diferentes intensidades de la amenaza.
- Evaluación del riesgo: cálculo de riesgos para cada escenario con una probabilidad dada y para cada tipo de impacto.
- Análisis de los efectos indirectos de los distintos tipos de deslizamientos y de las posibles interacciones entre los diferentes tipos de amenazas.

Para la elaboración de un mapa de riesgo de deslizamiento es necesario, por tanto, comenzar con la recopilación de toda la información disponible sobre las características del terreno objeto de estudio, el análisis de

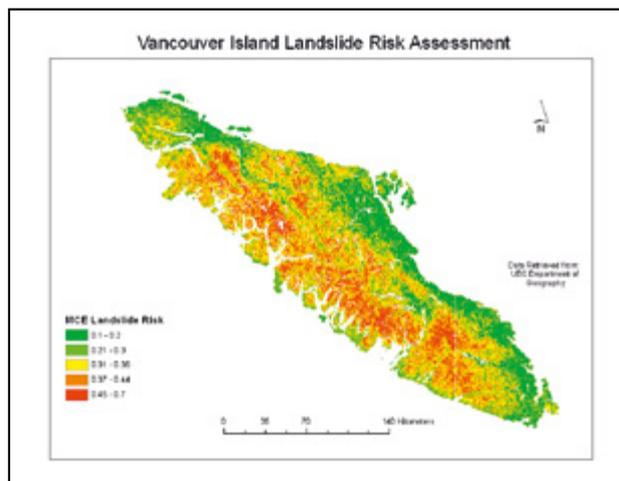
los factores que pueden provocar deslizamientos en la zona y el análisis de los movimientos ocurridos en la zona a lo largo de la historia de los que se tiene conocimiento.

A partir de estos datos de entrada, como se recoge en la figura 10, se puede proceder a realizar un cálculo de la probabilidad de que se produzca un deslizamiento en el área considerada, y del comportamiento de la masa de tierra movilizada. Esto permite evaluar la amenaza de deslizamiento en esa área.



**Figura 10.** Proceso para la evaluación del riesgo por deslizamiento de laderas.

El resultado de este proceso es la obtención de un mapa de riesgo de deslizamiento en el que se representan mediante códigos numéricos, de colores, etc., los niveles de daño que se producirían, en cada zona del área estudiada, si la amenaza de deslizamiento se realizase (figura 11).



**Figura 11.** Mapa de riesgo de deslizamiento de la isla de Vancouver (tomado de UBC Geography).

Esta información, en manos de los gestores públicos, es utilizada para el diseño de las medidas de prevención o mitigación que se estiman convenientes.

## 6. DATOS DE PARTIDA

Siguiendo el esquema presentado en la figura 10 para iniciar el proceso de elaboración de un mapa de riesgo es necesario disponer inicialmente de información sobre el terreno objeto de estudio.

### 6.1. Factores característicos de la ladera

Los factores internos que inciden en los procesos de inestabilidad de una ladera pueden ser intrínsecos, cuando se refieren a la propia naturaleza del terreno y a su resistencia (factores: geológicos, hidrológicos o hidrogeológicos) y extrínsecos cuando se refieren a la morfología del talud y sus condiciones ambientales (factores geomorfológicos y climáticos)

### 6.2. Factores detonantes

Los detonantes o desencadenantes son factores externos que actúan sobre el terreno modificando sus condiciones iniciales y provocando la rotura del estado de equilibrio.

Los principales causantes de los deslizamientos son la infiltración de agua en el terreno, las vibraciones producidas por los movimientos sísmicos y las modificaciones antrópicas. Dos ejemplos de estos últimos se recogen en las figuras 12 y 13.



**Figura 12.** Deslizamiento en la carretera NA-2424 en 2013 Liébana, Navarra.



**Figura 13.** Asentamientos incontrolados en laderas, Río de Janeiro (2010).

### 6.3. Inventario de deslizamientos

De entre todos los datos de entrada necesarios para la realización de los mapas de riesgo, el inventario de deslizamientos o mapa de deslizamientos, es considerado el más importante ya que proporciona información sobre la frecuencia, los tipos, la magnitud y el daño que causan los deslizamientos en un área (Van Westen, 2005). Estos mapas son los documentos que registran el grado de afectación a los movimientos de ladera que sufre una determinada zona, información necesaria para determinar la susceptibilidad, amenaza y riesgo al deslizamiento en ese área.

## 7. MAPAS DE AMENAZA DE DESLIZAMIENTO

El término amenaza, recoge la probabilidad de que un peligro se materialice. Los mapas de amenaza de deslizamiento muestran la probabilidad espacio-temporal de que se produzca un deslizamiento. Para ello dividen el territorio en zonas a las que asignan diferentes niveles de amenaza.

El análisis de la amenaza requiere también obtener información sobre la magnitud de los deslizamientos ya que es un factor fundamental para determinar los daños ocasionados por éstos. La magnitud está relacionada con el potencial destructivo de un deslizamiento, e incluye parámetros como velocidad, energía del movimiento, volumen o espesor de la masa en movimiento.

### 7.1. Métodos para evaluar la amenaza de deslizamiento

Los métodos para evaluar la amenaza de deslizamiento pueden dividirse, de manera general, en dos grandes grupos: directos o indirectos. A partir de ahí, el resto de clasificaciones son subjetivas y dependen de los aspectos considerados por el autor. La clasificación que más aparece en los textos consultados es la de Soeters y Van Westen, (Suárez, 2008) que distingue entre:

- Métodos determinísticos
- Métodos heurísticos.
- Métodos probabilísticos
- Métodos geomorfológicos

Los últimos avances tecnológicos han originado la aparición de métodos híbridos, que combinan algunos de los modelos tradicionales con la aplicación de técnicas basadas en el aprendizaje y en las funciones de pertenencia, redes neuronales artificiales y la lógica difusa.

#### 7.1.1. Métodos determinísticos

Los métodos determinísticos han sido los más utilizados durante décadas, hasta la aparición de los SIG, con los que ahora se combinan, y su empleo ha producido buenos resultados a la hora de obtener la susceptibilidad.

Se basan en el cálculo del factor de seguridad al deslizamiento de una ladera. Para este cálculo es necesario elaborar modelos de análisis de estabilidad de taludes, que requieren información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales y modelos de simulación de niveles freáticos de acuerdo a periodos de retorno. Estos modelos permiten el análisis, no sólo de la susceptibilidad a la rotura, sino también del alcance y de la frecuencia del fenómeno y por tanto de la amenaza de deslizamiento.

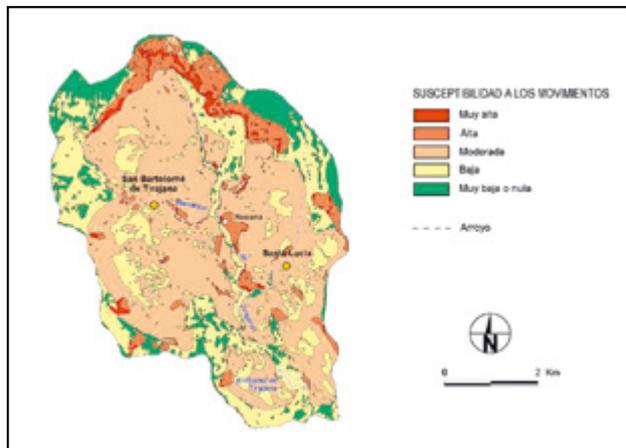
Los métodos deterministas son muy fiables y precisos cuando se dispone de los datos necesarios sobre los parámetros resistentes de la ladera y permiten realizar un análisis rápido y barato de la estabilidad del terreno.

#### 7.1.2. Métodos heurísticos

Están basados en el conocimiento experto. En este tipo de métodos, son los profesionales responsables de realizar

el trabajo los encargados de ponderar la influencia de cada factor en la inestabilidad de la ladera y así, de asignarle un peso, un grado de importancia dentro del proceso (Carrara et al., 1995).

Son métodos conocidos como indirectos y una de sus ventajas es que los resultados se pueden extrapolar a zonas sin deslizamientos pero que posean una combinación de factores similar (figura 14).



**Figura 14.** Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos en la Depresión de Tirajana obtenido a partir de métodos heurísticos (tomado de Hervás, Barredo y Lomoschitz 2002).

El principal inconveniente radica en que cuando el conocimiento disponible sobre los factores que pueden causar la inestabilidad es inadecuado o insuficiente, todo queda en manos de la experiencia de los expertos. El grado de subjetividad que induce el criterio del autor imposibilita comparar los trabajos realizados por distintos expertos.

### 7.1.3. Métodos probabilísticos

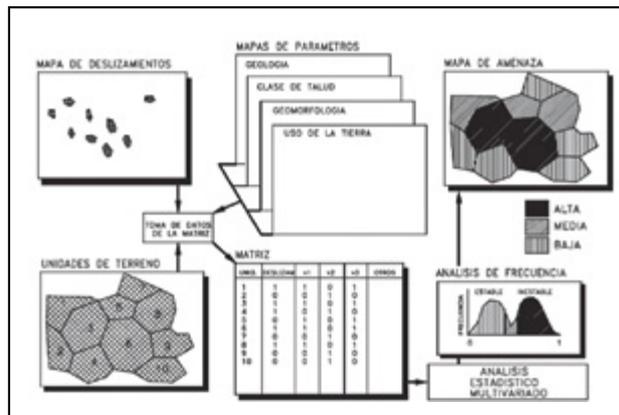
Se basan en las relaciones existentes entre cada factor detonante del evento y su distribución actual y pasada. Se utilizan cuando se dispone de abundante información sobre las causas que producen los deslizamientos.

Son métodos indirectos que se pueden extrapolar a zonas distintas de las utilizadas para estimar la susceptibilidad, pero que posean condiciones geológicas y climáticas homogéneas. Estas aproximaciones permiten que los resultados se puedan aplicar a escala regional.

Los modelos probabilísticos se clasifican como bivariantes y multivariantes:

- Los métodos bivariantes consideran una variable dependiente, la ocurrencia de deslizamientos, y una independiente. El peso de cada factor se analiza por separado. Lo que se pretende, es la cuantificación de los factores que más influyen en los movimientos de ladera mediante el cálculo de la densidad de deslizamientos para cada variable. Este tipo de métodos son adecuados para escalas medias.
- Los métodos multivariantes (figura 15) estudian la interacción y dependencia de un conjunto de factores que actúan simultáneamente en la ocurrencia de deslizamientos para establecer la implicación que tienen cada uno de ellos. Se trata de una aproximación más objetiva en la predicción espacial de los deslizamientos.

La principal ventaja de los métodos probabilísticos es su objetividad, por otro lado tienen en su contra el gran coste económico que suponen los trabajos que hay que llevar a cabo para obtener los datos necesarios para su aplicación.



**Figura 15.** Esquema del análisis estadístico multivariante mediante SIG elaborado por Soeters y Van Westen en, 1996. (Tomado de Suárez, 2008).

### 7.1.4. Métodos geomorfológicos

Se basan en la determinación de las condiciones de inestabilidad de la ladera mediante técnicas geomorfológicas.

Son métodos directos en los que el autor, a partir de la cartografía geomorfológica, identifica y localiza los deslizamientos y procesos asociados a éstos directamente en el campo. Mediante el trabajo *in situ*, el experto extrae unos criterios para la determinación de áreas potencialmente inestables y para la confección del mapa de susceptibilidad o peligrosidad final.

Estos métodos, al igual que los heurísticos y los probabilísticos, necesitan de un inventario de deslizamientos del área de estudio para su desarrollo.

La principal ventaja de estos métodos es la validez y detalle del análisis y mapa resultantes si se realizan por un buen experto. Su inconveniente es el alto grado de subjetividad, función de la experiencia del autor. La elaboración de mapas por esta técnica requiere conocer la morfología y tipología de los movimientos.

### 7.1.5. Redes neuronales artificiales o técnicas basadas en el aprendizaje

Las técnicas de aprendizaje utilizan la misma hipótesis que los métodos estadísticos, se basan en el análisis de las relaciones entre la distribución espacial de los factores condicionantes de la inestabilidad de la ladera y la de los deslizamientos observados pero, a diferencia de estos, que asumen que las relaciones entre los factores que intervienen en el proceso y las observaciones son lineales, estas técnicas permiten relaciones no lineales. Se asume que los factores que causaron roturas en una región específica son similares a las que los producirán en el futuro. Así estas técnicas buscan definir un modelo que ajuste una función de interés minimizando numéricamente el error encontrado entre la salida estimada y al respuesta disponible de un conjunto de datos previamente conocido.

### 7.1.6. Elección de la metodología

La aplicación de uno u otro método depende sobre todo de las características y extensión de la zona, del tipo y magnitud de los deslizamientos existentes, de los datos geotécnicos e hidrogeológicos disponibles y de la escala de trabajo (Hervás, Barredo y Lomoschitz, 2002).

Si consideramos la escala, los métodos determinísticos son más adecuados para trabajar a escala 1/5.000 o de mayor detalle, mientras que difícilmente pueden aplicarse a escalas medias (1:25.000 y 1:50.000), ya que no suele ser posible obtener la gran cantidad de datos necesarios en esos casos. Los heurísticos se adaptan mejor a los trabajos a nivel regional (1/100.000) y, los estadísticos son adecuados para escalas grandes y medias (1/10000 y 1:25.000), pero no menores, ya que estudios a nivel regional suponen una gran inversión económica en la obtención de datos.

Cuando en la zona de estudio prevalecen los deslizamientos frente a las áreas estables, los métodos estadísticos tampoco son de aplicación.

## 8. ELEMENTOS EN RIESGO Y EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Continuando con los pasos a seguir para llevar a cabo la elaboración de un mapa de riesgo de deslizamiento de laderas (figura 10), y una vez evaluada la amenaza, es necesario estudiar los elementos a los que ésta afecta.

Dentro de este grupo se incluyen elementos de carácter muy variado. Todos los bienes que se encuentran en un área determinada y pueden ser afectados desfavorablemente por un peligro son llamados elementos en riesgo, (figura 16). Habitualmente se dividen en los siguientes grupos (García López-Davadillo, 2005): población, edificios, estructuras, servicios e infraestructuras, propiedades, actividades de ocio o económicas y aspectos medioambientales.

Los daños dependen del uso del suelo, siendo más frecuentes en las zonas montañosas donde las características del terreno favorecen una mayor ocurrencia de deslizamientos, al mismo tiempo que la menor población existente en esas áreas disminuye su incidencia.

Una vez conocidos los elementos en riesgo es necesario realizar una evaluación de su vulnerabilidad. La vulnerabilidad es el nivel de daño que sufrirá un elemento si se produce un deslizamiento de tierras de determinada magnitud. Es una medida de la dureza o fragilidad, así como del nivel de exposición o protección frente a la amenaza, del elemento en cuestión.



**Figura 16.** Viviendas en riesgo ante el avance de un deslizamiento en Los Llanos (Cantabria, 2013).

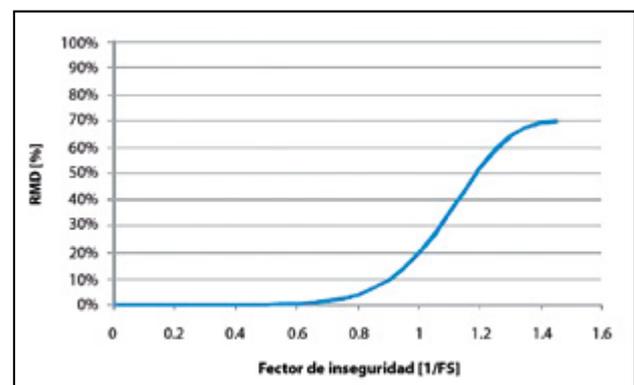
La vulnerabilidad también puede reflejarse en términos cualitativos, así en el caso de infraestructuras y edificios, el

nivel de daño se puede expresar en función de cómo quedaría el elemento después del deslizamiento. Daños menores, supondrían que la infraestructura quedaría en servicio después del evento, mientras que daños graves o muy graves, podrían suponer la destrucción total (figura 17).



**Figura 17.** Deslizamiento de Sau Mau Ping, Hong Kong (1972). Flujo deslizante que produjo la muerte de 67 personas y heridas a otras 20 al arrasar un edificio de 12 plantas (tomado de García López-Davadillo, 2005).

Se define como función de vulnerabilidad a la relación matemática que expresa de forma continua el daño que puede sufrir un elemento específico, cuando se somete a un deslizamiento de una determinada magnitud, o lo que es lo mismo, son curvas que relacionan la Relación Media de Daño (RMD) con la amenaza de deslizamiento medida en este caso como la inversa del factor de seguridad de la ladera. (figura 18).



**Figura 18.** Función de vulnerabilidad característica para los deslizamientos. (Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales consorcio de evaluación de riesgos naturales de América Latina. Velásquez, 2011).

## 9. MAPAS DE RIESGO DE DESLIZAMIENTO

El mapa de riesgo de deslizamiento es el resultado final del proceso que se ha ido desarrollando en los capítulos anteriores. Recoge, tanto la información sobre la amenaza de deslizamientos como los datos acerca de los elementos en riesgo y su vulnerabilidad distinguiendo, en función de ellos, entre zonas expuestas a distintitos niveles de riesgo.

La clasificación de los métodos para la evaluación del riesgo por deslizamiento más utilizada es la propuesta por el Subcomité de Gestión de Riesgo de deslizamiento de la Sociedad Australiana de Geomecánica (Van Westen et al.,

2006), esta clasificación está basada en el nivel de cuantificación del riesgo y es la siguiente:

- Métodos cualitativos: este tipo de análisis utiliza términos descriptivos para definir la posibilidad de ocurrencia del deslizamiento y sus consecuencias, a partir de valoraciones subjetivas, generalmente se basa en el juicio de expertos.
- Métodos semicuantitativos involucra la combinación de medidas cualitativas y cuantitativas de la probabilidad de ocurrencia de deslizamiento y sus consecuencias. Usualmente se tienen las probabilidades de ocurrencia pero las consecuencias se definen cualitativamente.
- Métodos cuantitativos: análisis basado en los valores numéricos de la probabilidad de la amenaza, vulnerabilidad y consecuencias, y resultan en un valor numérico del riesgo.

A esta variedad de métodos es necesario sumarle las distintas formas posibles, para realizar el estudio de la amenaza, de tal manera que existen múltiples combinaciones a la hora de realizar el trabajo. De entre todas estas posibles combinaciones algunas son más adecuadas que otras a la hora de realizar los mapas de riesgo, como se recoge en la siguiente tabla (Van Westen, 2005), donde:

- 0: representa que el método utilizado en el cálculo de la amenaza no es apropiado para el método de riesgo escogido.
- 1: la combinación es moderadamente útil.
- 2: el método empleado para obtener la amenaza de deslizamiento es el mejor para la obtención del riesgo, en función de que se disponga de datos suficientes.
- 3: mejor combinación entre métodos.

**Tabla 2.** Posibles combinaciones y su grado de utilidad entre métodos para calcular la amenaza y el riesgo de deslizamiento (traducida de Van Westen, 2005)

Riesgo Amenaza	Cualitativo	Semicuantitativo	Cuantitativo
Geomorfológico	2	2	2
Heurístico	3	3	0
Estadístico	3	2	2
Determinista	0	1	3

El análisis cualitativo es la forma más simple de realizar un estudio de riesgo de deslizamientos, por supuesto, requiere del conocimiento de las amenazas, los elementos en riesgo y sus vulnerabilidades pero expresados de forma cualitativa, lo que facilita el trabajo. Los diversos atributos pueden clasificarse o calificarse de tal forma que se expresa el riesgo de una forma prácticamente verbal.

Para la realización de mapas cuantitativos los métodos basados en inventarios de deslizamientos son generalmente los mejores, asumiendo que la ocurrencia de deslizamientos en el pasado es el dato más adecuado para calcular la probabilidad de que se produzcan en el futuro. El mayor inconveniente es que el método requiere de

un completo historial de deslizamientos y no es aplicable en zonas en las que se producen grandes cambios en el terreno o en las que, a consecuencia del cambio climático, se estima que la frecuencia de deslizamientos se intensifique.

Los métodos heurísticos permiten realizar tanto trabajos cualitativos como cuantitativos y pueden aplicarse en la realización de mapas de grandes áreas.

Los métodos estadísticos combinados con mapas de inventario de deslizamientos generados por distintos detonantes pueden llegar a ser el mejor método para evaluar el riesgo de forma cuantitativa en grandes áreas.

## 10. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo un recorrido a través de los distintos elementos que componen el proceso de elaboración de un mapa de riesgos de deslizamientos de ladera. En él se señalan los conceptos más importantes y se definen las metodologías cuyo uso está más extendido a la hora de realizarlos.

A modo de conclusiones, se recogen algunas ideas que se han ido extrayendo de la lectura de los distintos documentos consultados:

- A pesar de existir una clasificación de metodologías de elaboración de mapas de riesgos reconocida por la mayoría de los autores (la incluida en este trabajo), ésta no es universal y tampoco hay establecido ningún tipo de normas o estándares a la hora de realizarlos. La gran cantidad de parámetros que intervienen en los procesos de deslizamiento, las características propias de cada área geográfica y la variedad de metodologías existentes dificultan la tarea de uniformizar el proceso. A pesar de esto, puede que la intervención de las administraciones en el proceso, como demandantes de estos trabajos, y la inclusión de estos mapas como herramientas para la planificación urbanística reconocidas por la legislación, faciliten el camino hacia la creación de ciertas reglas para su ejecución
- El número de proyectos que llegan a realizar una estimación del riesgo, es mucho menor que el de los que estudian la susceptibilidad y amenaza. La mayoría de los trabajos se centran en el estudio del comportamiento de los deslizamientos y las causas que los producen sin salir del campo de la investigación geocientífica. La realización de mapas de riesgo requiere de otro tipo de análisis más allá de esta área y de la intervención de equipos multidisciplinares en su elaboración.
- El tipo de deslizamiento a estudiar parece marcar la clase de trabajo a realizar. Si bien el número de trabajos en los que se llega a una valoración cuantitativa del riesgo, es, de por sí, bastante más reducido que el de los que realizan una estimación cualitativa, cabe señalar, que éstos parecen aumentar cuando se trata del estudio de desprendimientos de rocas. Este hecho quizá se deba a que la definición de las trayectorias y de los tamaños de bloques desprendidos y su efecto sobre los elementos en riesgo sea más sencilla de abordar que en el caso de otro tipo de deslizamientos.

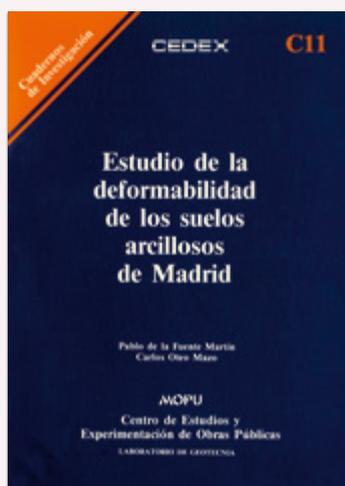
- Prácticamente todos los autores señalan al mapa inventario de deslizamientos como clave para llegar a un mapa de riesgo fiable. La importancia del inventario de deslizamientos es un hecho que se señala en la gran mayoría de los textos consultados. Hay autores que concluyen que incluso antes de desarrollar sofisticadas técnicas para el mapeo de la amenaza, es conveniente centrar los esfuerzos en mejorar la cartografía de deslizamientos. De los trabajos consultados puede extraerse, que el estudio del riesgo de deslizamiento de los taludes a lo largo de infraestructuras lineales importantes, como carreteras o vías férreas, no adolece tanto de este problema. Esto se debe a que las entidades encargadas de su mantenimiento, sí recogen de forma sistemática las causas, fechas y características de los eventos que las afectan posibilitando así realizar inventarios muy completos.
- El incremento que se viene registrando de los daños personales y materiales ocasionados por catástrofes naturales relacionadas con los efectos del cambio climático, lleva a las compañías de seguros y otras entidades públicas y privadas, a interesarse por las herramientas disponibles para gestionar estas eventualidades.
- No existe una metodología mejor que otra para la realización de mapas de riesgos. Las bondades de cada uno de los métodos están más relacionadas con las peculiaridades del trabajo que se esté realizando que con las características del propio método. Los datos disponibles, las características de los deslizamientos, la escala de trabajo, las herramientas a utilizar y el objetivo de la investigación son los que deben marcar la elección del método a aplicar.

## 11. AGRADECIMIENTOS

Gracias a Juan Antonio Díez Torres, Javier González-Gallego, Fernando Pardo de Santayana, Cristina Bernabeu y a mis compañeros de promoción de 2013 del Máster de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica por su colaboración en la elaboración de la tesina en la que se basa este artículo. Gracias también a Cristina de Santiago Buey por brindarme la oportunidad de realizar esta publicación.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Bonnard, Ch. (2008). *Risk theory and risk analysis for landslides*. LARAM School - II-7.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. y Reinchenbach, P. (1995). *GIS technology in zapping landslide hazard*. En: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 135-175.
- Corominas, J. y García Yagüe, A. (1997). *Terminología de los movimientos de ladera*. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol.3: 1051-1072.
- Cruden, D. M. y Varnes D.J. (1996). *Landslide types and processes*. En A. K. Turner y R.L. Schuster (Editores): *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press. Washington D.C. pp. 36-75.
- García López-Davadiello, J.C. (2005). *Análisis de la vulnerabilidad por movimientos de ladera: Desarrollo de las metodologías para evaluación y cartografía de la vulnerabilidad*.
- Hervás, J., Barredo, J.I. y Lomoschitz, A. (2002). *Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, tele-detección y métodos de evaluación multicriterio*. Aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria). En Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Ed: Ayala-Carcedo y Corominas. ISBN 84-7840-466-X. P. 169.
- Leroi, E. (1996) *Landslide hazard- Risk maps at different scales: Objectives, Tools and developments*. En: Senneset K (ed) VII International Symposium on Landslide. A.A.Balkema, Trondheim, Norway, pp 35-51.
- Suárez, J. (2008) *Deslizamientos. Análisis Geotécnico. Volumen 1*. Capítulo 13 pp 527-579.
- Van Westen, C.J (2005) *Landslide hazard and risk assesment*. Refresher Course on Geo-Information for Natural Disaster Reduction in Eastern Africa. Departament of Geography, Makerere University. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC).
- Van Westen, C.J, Van Asch, T.W.J y Soeters, R. (2006). *Landslide hazard and risk zonation - why is it still so difficult?* Published online. Springer-Verlag.
- Varnes, D.J. (1978) *Slope movement types and processes. Special Report 176: Landslides: Analysis and Control*. Eds: Swchuster, R.L. & Krizek, R. J.) Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D.C., 11-33.
- Velásquez, C. (2011). *Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. Tomo I*. Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales (ERN), América Latina.



## Estudio de la deformabilidad de los suelos arcillosos de Madrid

Autores: Pablo de la Fuente Martín y Carlos Oteo Mazo

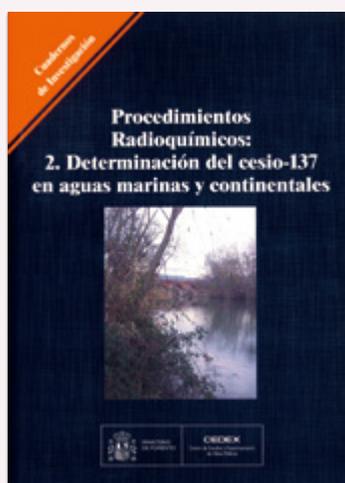
Serie Monografías: C-11

ISBN: 84-505-4128-X

Año: 1986

PVP: 18,03€

El objeto de estudio de este trabajo son los suelos tosquizados presentes en la facies detrítica de Madrid. Para ello se utilizan diversas técnicas experimentales, tanto en laboratorio como in situ, que permiten evaluar la deformabilidad de este tipo de suelo. Se han utilizado ensayos edométricos de tipo convencional sobre muestras inalteradas y sobre otras compactadas. Los resultados obtenidos son objeto de análisis y a partir de estos, se definen los procedimientos que pueden conducir a una mejor evaluación de la deformabilidad.



## Procedimientos radioquímicos: 2. Determinación del Cesio-137 en aguas marinas y continentales

Autores: Luis Pujol Teres y José A. Suárez Navarro

Serie Monografías: C-45

ISBN: 84-7790-379-4

Año: 2002

PVP: 9€

En este cuaderno de investigación se presenta los estudios realizados para la puesta a punto de un método radioquímico para la determinación del cesio-137 en aguas continentales y marinas. Este método consiste en un arrastre mediante molibdofosfato amónico y posterior medida por espectrometría gamma de alta resolución. También se ha realizado una revisión de los diferentes métodos radioquímicos existentes, así como un estudio sobre los valores de actividad obtenidos por otros autores.