

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Facultad de Ciencias

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

TESIS DOCTORAL

**Desarrollo, aplicación y validación de
procedimientos y modelos para la evaluación
de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a
procesos geomorfológicos**

MEMORIA PRESENTADA POR

Jaime Bonachea Pico

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR LA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

SANTANDER, JULIO 2006

D. José Ramón Díaz de Terán Mira y D. Juan Remondo Tejerina, Profesor Titular de Geodinámica Externa y Profesor Contratado Doctor de Geodinámica Externa, respectivamente,

INFORMAN:

Que el trabajo presentado en esta memoria titulado “*Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos*”, ha sido realizado bajo su dirección en el Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cantabria, y dan su conformidad para que dicha Memoria sea presentada y tenga lugar, posteriormente, su Lectura y Defensa.

Santander, 3 de Julio de 2006

Fdo.: José Ramón Díaz de Terán Mira

Fdo.: Juan Remondo Tejerina

"En la naturaleza, no hay castigos ni premios, sólo consecuencias"

Proverbio chino

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis ha sido financiado por proyectos europeos, nacionales y regionales, sin cuyo soporte económico no habría sido posible llevarlo a cabo:

- Geomorphology and EIA of Transportation Systems (GETS), Training and Mobility of Researchers (TMR), contract FMRX-CT98-0162.
- Assessment of landslide risk and mitigation in mountain areas (ALARM), contract EVG1-CT-2001-00038.
- Aplicación de la fotogrametría digital al análisis de la susceptibilidad y peligrosidad de los procesos de inestabilidad de laderas (FODISPIL). Plan Nacional de I+D+i (2002-2005). REN2002-00079/RIES.
- Desarrollo y validación de modelos predictivos de peligrosidad por dolinas en terrenos evaporíticos mediante técnicas de análisis espacial. Plan Nacional de I+D+i (2004-2007). CGL2004-02892/BTE.
- Zonificación agro-ecológica de Cantabria: un estudio del potencial regional para el desarrollo de actividades agroganaderas. Gobierno de Cantabria.

La elaboración de esta tesis ha sido posible gracias al apoyo humano de muchas de las personas que me rodean, tanto en el mundo profesional como familiar, a las cuales, mediante estas líneas, les quisiera expresar mi agradecimiento por su constante aliento y palabras de ánimo. Antes de nombrar a nadie, quiero que sepáis que de todos vosotros me llevo algo, por lo que siempre tendréis un hueco en mi corazón y en mi pensamiento.

Quiero agradecer especialmente a mis directores, José Ramón y Juan, por el tiempo que han dedicado para que este barco llegase a buen puerto, por su ayuda, ideas, sugerencias y consejos, además de su amistad y ánimo en los momentos difíciles. También agradecer a Juan Remondo el que haya facilitado sus datos para realizar los análisis de susceptibilidad.

A Antonio Cendrero, por su inestimable apoyo y sus comentarios que han hecho surgir nuevas preguntas, reflexiones e ideas, las cuales han enriquecido este trabajo.

A Alberto González, Enrique Francés, Luís Salas y Javier Barba, con los cuales he disfrutado de momentos inolvidables, tanto profesional como personalmente.

A Victoria y a Luis, por su amistad, sus consejos y apoyo en todo momento.

A Nieves y a Luis, por su simpatía, amistad y preocupación en muchos de los momentos que hemos pasado juntos.

A los becarios, geólogos y físicos, los que están y los que ya no están, a los cuales me gustaría nombrar aquí ya que hemos pasado buenos y malos momentos juntos. En especial agradecer a Viola, Nacho, David, Ferrán, José M^a, Jorge, Noelia, Rebeca, Almudena, Rafa, Oti y a otros muchos que, no por no nombrarles son menos importantes.

Al resto de las personas del Departamento, por su amistad y el cariño que me han demostrado a lo largo de todo este tiempo.

A tutti i colleghi dell'Università di Modena e Reggio Emilia (Italia), li ringrazio per il suo aiuto e la sua amicizia, grazie mille di cuore.

To all people involved in the ALARM project, especially to Andrea Zannoni, who tragically died at the end of the project. I remember the special moments that we passed together during the meetings and congresses.

Al grupo de Geodinámica Externa de la Universidad de Zaragoza, con los cuales he colaborado en el último año. Gracias a todos ellos, que han generado y tratado la información básica para elaborar modelos de susceptibilidad, he aprendido un poco más sobre el proceso de aparición de dolinas en terrenos evaporíticos.

A todos los miembros de la Diputación Foral de Guipúzcoa que me han facilitado información muy útil para llevar a cabo esta tesis, en especial a Mikel Elorza del Departamento de Ordenación y Promoción Territorial y, también, agradecer al resto de personas anónimas la ayuda que me han brindado para conseguir datos utilizados en este trabajo.

A mis amigos, Bea, Merche, Raquel, Pedro, Carlos y Jesús, quienes han compartido más directamente mis ilusiones y problemas.

Y sobre todo, agradecer a mis padres, a mi hermana, a Marco y a Olivia, y especialmente a mi hermano Carlos, que nos dejó en los inicios de esta tesis, y a quien quiero dedicársela con todo mi corazón, el apoyo que me han brindado durante todo este tiempo.

A mi hermano, Carlos

PRESENTACIÓN

La memoria de Tesis que a continuación se presenta consta de 8 capítulos o secciones, además del correspondiente a la bibliografía y los anexos. Tanto el resumen como las conclusiones se han redactado en inglés para facilitar la lectura a personas no versadas en la lengua española.

En el capítulo primero, se presenta una introducción de la problemática general que plantean los riesgos naturales. Se hace una revisión de la importancia mundial de los distintos procesos que originan daños, así como las tendencias de aumento en cuanto a número de eventos y pérdidas esperables en el futuro más próximo, prestando especial atención a los deslizamientos. Los incrementos que muestran los riesgos naturales a nivel mundial parece que están muy ligados con el desarrollo económico experimentado por la población y los sistemas productivos.

El capítulo 2 muestra una revisión general de las principales estrategias desarrolladas para reducir los riesgos naturales. En algunos países existen programas nacionales que desarrollan normas o acciones con el fin de disminuir los riesgos naturales y, en especial, por deslizamientos; en Europa, en los últimos años se han dedicado esfuerzos importantes a la investigación de los riesgos naturales. Se presenta aquí una recopilación sobre la legislación y las cartografías existentes en algunos países europeos y, especialmente, en España, en relación con los riesgos naturales. En el Anexo I se incluye un informe recopilatorio, realizado en el ámbito del proyecto ALARM, que muestra los distintos aspectos legales, jurídicos, cartográficos, etc. existentes en diferentes países europeos en relación con la gestión de riesgos naturales.

El tercer capítulo revisa el estado del arte en materia de cartografías o mapas de susceptibilidad, peligrosidad, elementos expuestos, vulnerabilidad y riesgo. Se comentan algunas de las limitaciones que presentan los métodos propuestos hasta el momento, así como se proponen ciertas vías para mejorar métodos ya existentes.

A partir de la revisión anterior, en el capítulo 4, se plantea el problema que se aborda en la tesis, con el fin de contribuir a la resolución de algunas de las limitaciones identificadas.

En el capítulo 5 se presenta la hipótesis de trabajo y los objetivos generales y específicos que se pretenden alcanzar con este trabajo.

En el siguiente capítulo, el capítulo 6, se describe la metodología utilizada para generar modelos de susceptibilidad, peligrosidad, elementos expuestos, vulnerabilidad y riesgo. A partir del método de las Funciones de Favorabilidad, teniendo en cuenta una hipótesis de rotura de las laderas, se consideran las relaciones estadísticas entre las variables condicionantes o causales de los deslizamientos y los propios movimientos. Finalmente se obtiene un modelo de susceptibilidad que ulteriormente es transformado en un modelo de

peligrosidad, partiendo de una serie de suposiciones para el futuro, obtenidas a partir de datos sobre la frecuencia y magnitud de los deslizamientos en el pasado. La integración de los modelos de peligrosidad con los mapas de elementos expuestos (de su valor económico) y de vulnerabilidad (obtenidos mediante la relación entre pérdidas sufridas por el elemento y valor del mismo), permite obtener mapas de riesgo por deslizamiento, expresados en pérdidas por píxel para un determinado periodo de tiempo. En el Anexo II, se describen los metadatos de las distintas variables utilizadas en los análisis del riesgo, así como de algunos de los modelos obtenidos.

El capítulo 7 muestra los resultados obtenidos en relación con los objetivos perseguidos en los distintos subapartados: susceptibilidad, peligrosidad, elementos expuestos, vulnerabilidad y riesgo. En este capítulo, se plantea la necesidad de disponer de bases de datos sobre eventos de deslizamientos con el fin de establecer la posible correlación existente entre indicadores de actividad humana y frecuencia de deslizamientos en algunos de los países para los cuales se ha podido obtener información sobre eventos en el pasado. Parte de esa información permite extraer las frecuencias pasadas de deslizamientos que, a su vez, sirven para generar escenarios de frecuencia futura.

Además, en el capítulo 7 se presenta un ejemplo de aplicación de los métodos probabilísticos al estudio de un proceso geomorfológico diferente a los deslizamientos: la predicción de dolinas en terrenos evaporíticos. Es la primera vez que se aplican estos métodos a este tipo de proceso.

Finalmente, el capítulo 8 presenta las principales conclusiones que se desprenden de esta memoria de Tesis, de acuerdo con los objetivos planteados y los resultados obtenidos, y se plantean algunas de las líneas de investigación futuras que permitan mejorar los resultados obtenidos hasta el momento.

SUMMARY

Concern about the consequences of geomorphic hazards has been growing for the last couple of decades, from international to local levels. Among many examples of this concern are: the increasing presence of natural hazards in European Research programmes, national analyses of the impact of natural hazards and local programmes for geomorphic hazard assessment and reduction. Allocation of resources to prevent potential unwanted effects, mainly when they are scarce, can be greatly facilitated if forecasts on the future distribution of potential damages can be made in quantitative terms. Remedial measures reflect greater hazard awareness by both the general public and decision makers, in part due to improved information but also significant increase in the number of disasters and resulting damage during the second half of the last century.

There is a need to improve our understanding of geomorphic processes in general and slope instability in particular, to reduce future damage. During the last three decades, many efforts have been devoted by geomorphologists to develop slope hazard maps, with the explicit or underlying aim of improving the management of slope instability. However, geomorphologic analyses have normally stopped at the hazard assessment stage. Few attempts have gone further, to the qualitative and/or quantitative assessment of risk. This contrast probably reflects the difficulties of obtaining data on past losses and, even more so, assessing future losses, especially if not only direct damage is considered, but also indirect costs due to the disruption of economic activity. If the ultimate aim of geomorphic hazard and risk assessment is a more efficient management of hazardous processes, procedures to forecast future losses must be developed. Quantitative risk assessments will make it possible to identify the areas where greater losses are to be expected and, therefore, where mitigation efforts should be first directed in order to achieve the best benefit/cost ratios.

A method for quantitatively assessing landslide hazard and risk has been developed and tested in a study area of 140 Km² located in the lower part of the Deva Valley, at the north-western part of Guipúzcoa (Spain). The area was chosen because it is particularly suitable for the application of statistical methods. Bajo Deva study area is intensely affected by slope movements (with about 3,000 inventoried since 1954) triggered both directly by intense rainfall and indirectly by human activities. Approximately 75 % of them are shallow landslides and flows affecting the regolith, with an average size around 500 m² and 250 m³. The main triggers are intense rainfall episodes as well as direct and indirect human action. The intensity of the natural processes, together with the dense network of infrastructures and other exposed elements, make the area very suitable for the application of the method.

The underlying hypothesis is that past behaviour of mass movement processes and their effects on human elements can be used to derive, through statistical relationships, models that can be used to predict future probability of occurrence and, to some extent, damage.

The aim of the present work has been to develop an approach for landslide risk assessment based on probabilistic susceptibility and hazard models, incorporating the consideration of different scenarios of future process behaviour. Those scenarios are based on the assumption that direct and indirect human influence as a triggering factor is likely to increase, as shown by relationships observed in the past between landslide frequency and socio-economic driving forces.

The procedure started with the development and evaluation of probabilistic susceptibility models. Susceptibility analysis was carried out through correlation between past shallow translational landslides and spatial parameters related to instability: terrain geometry, land cover, geology, geomorphology, regolith thickness and proximity to rivers and faults. Analyses of the statistical relationships were carried out using Favourability Functions (FF). In order to model the future behaviour of slopes, it is also necessary to consider the landslide magnitude. Therefore, a scenario based on the average landslide occurred in the area has been defined and incorporated into the susceptibility analysis. Susceptibility models thus obtained reflect relative spatial probability of landslide occurrence, run-out distance and landslide magnitude average.

Evaluations have been carried out comparing susceptibility maps based on past landslides with different sets of landslides not used in the analysis, following different strategies (landslides occurred in several, later periods, samples based on random selection and through splitting the area into two parts). As all the strategies show similar prediction rate curves, the prediction capability of the model was thus established. The best model obtained (more accurate prediction) was the one using the likelihood ratio function and terrain height, slope gradient, aspect, lithology, land cover and regolith thickness as conditioning variables, and the 1991-1997 landslide inventory. Prediction capability of susceptibility models thus obtained has improved in comparison with previous works. This is, at least in part, attributable to the processing of numerical variables as continuous and to the increase in the resolution of the DEM, as well as the use of better quality variables.

Landslide susceptibility models, showing spatial probability and expressed in numerical values (1 to 200), have been transformed into hazard models that show spatio-temporal probability (expressed as probability, 0 to 1) through an assessment of landslide frequency in the area. So, different landslide scenarios of future frequency, in terms of number of events to occur in a given period (next 10 and 50 years), have been considered to estimate temporal probability. The scenarios for future landslide occurrence are: A) Total No. of landslides in next 50 years equal to average in the past 50 years; B) No. of landslides in the future according to a linear trend; C) No. of landslides increasing according to an exponential trend. As landslide frequency has shown a clear decrease during the last four years analysed, it would also be reasonable to consider alternative scenarios fitting that trend. In any case, this type of hazard models can be directly integrated with maps of exposed elements and vulnerability maps to produce risk models, as indicated in the widely used expression proposed by Varnes, where risk is a function of the hazard, the exposed elements and the vulnerability of that element.

Different exposed elements have been identified and mapped and entered into a digital database comprising infrastructure, land use, buildings, and socio-economic activities. Due to the small size of most landslides in the area, no personal damages have been recorded. Therefore, people's vulnerability has not been considered in this work.

Values for the different types of elements have been easily obtained, through consultations with technical administration personnel, statistical organisms, landowners and construction companies and represented in maps, in €/pixel.

An inventory of direct losses during nearly 50 years has been carried out. Because data are not complete, extrapolations and assumptions have been needed for the assessment. This is particularly significant for indirect losses. While past direct losses can sometimes be obtained from records, indirect losses must be mainly estimated. However, public expenditure for road-damage repairs as well as other indicators have been used to test the estimated losses.

Vulnerability for each exposed element (expressed from 0 to 1) has been estimated by comparing damages experienced in the past by each type of element (if the element is affected by a landslide) with its actual value. A vulnerability map for each type of element considered in the analysis has been elaborated. In the case of indirect effects, each infrastructure sector shows the indirect potential losses to be expected.

When a hazardous event takes place, damage to material elements has an indirect effect by disrupting socio-economic activities. The concept of indirect damage is fuzzy and difficult to assess. The approach presented has tried to estimate potential losses indirectly due to the occurrence of damaging phenomena of the magnitude assumed that affect economic activity. The main indirect effect in the area is the interruption of lines of communication, which implies loss of working activity, and is directly related to the number of people affected.

Once maps of hazard, vulnerability and value have been created for different elements at risk, they have been combined in a direct risk map using the expression $R = H * E * V$. For each type of exposed element, a specific risk model has been obtained and then combined into a direct risk model by adding all models of specific risk. Risk models for each hazard scenario proposed show, for each pixel, 'theoretical monetary losses' expected in the next 10 or 50 years in the Bajo Deva area, due to shallow landslides. Indirect risk models have been obtained by integrating hazard models and indirect potential losses. All such models are expressed in monetary terms (€/pixel).

Finally, a total landslide risk model has been produced as the sum of the different direct and indirect risks described for each hazard scenario. Direct and indirect risk models differ in their meaning. Direct risk models show damage to structures actually located in each pixel, whereas indirect losses generated in a pixel do not affect the pixel itself, but a much wider and undefined area. Nevertheless, because risk is expressed in monetary terms, both models have been added to obtain the total risk map.

The results obtained show that the approach proposed and the hypothesis formulated are essentially correct and that the method presented provides the means to obtain risk maps with a quantitative, monetary meaning useful to identify areas where efforts at hazard mitigation will be most cost-effective. Nevertheless, independent evaluation for the quality of those maps is not yet completely satisfactory, and for this reason, several lines of work which could help to better test and improve the method are proposed.

Finally, the potential of the method for analysing other types of geomorphic risks has been tested through its application to an area of 50 km², located downstream of Zaragoza city in

the NE of Spain, affected by sinkholes due to evaporate karst. An analysis of the spatial distribution of sinkholes and their causal factors (mainly geomorphology, surface and subsurface geology, hydrogeology, human activities and structures) has been carried out in order to explore the possibility of correlating these factors with sinkhole distribution; probabilistic models similar to those used to elaborate landslide susceptibility models where applied. Preliminary results are promising, thus showing that it is suitable to apply these techniques to this type of process. In the future, if sufficient chronological data about past occurrences can be gathered, it will be possible to obtain hazard models.

RESUMEN

Durante las dos últimas décadas, la preocupación en cuanto a los daños ocasionados por los procesos geomorfológicos ha aumentado, tanto a nivel mundial como local. Entre algunos de los ejemplos que muestran esta preocupación cabe destacar: el incremento de los programas de investigación europeos sobre peligros naturales, los estudios nacionales sobre el impacto de los peligros naturales, así como la existencia de programas locales para evaluar y reducir la peligrosidad. La asignación de recursos para prevenir efectos potenciales no deseados, principalmente cuando dichos recursos son escasos, podría mejorarse si fuese posible hacer predicciones sobre la distribución futura de daños potenciales en términos económicos. Las medidas de mitigación reflejan un mayor conocimiento o conciencia del peligro por parte de la población y de los responsables de la toma de decisiones. Esto se debe, en parte, a la mejora de la información existente, pero también al aumento significativo en el número de desastres y en los daños económicos producido durante la segunda mitad del siglo pasado.

Existe una necesidad general de mejorar nuestro conocimiento sobre los procesos geomorfológicos y, en particular, sobre los procesos de inestabilidad de laderas para reducir los daños futuros. En las últimas tres décadas los geomorfólogos han dedicado grandes esfuerzos a desarrollar mapas de peligrosidad de deslizamientos, con el fin de mejorar la gestión de la inestabilidad de laderas. Sin embargo, los análisis geomorfológicos se han limitado al análisis de la peligrosidad. Pocos han sido los intentos de ir más lejos, esto es, evaluar cualitativa o cuantitativamente el riesgo. Esto probablemente refleja las dificultades existentes para obtener datos sobre pérdidas ocurridas en el pasado así como para evaluar las pérdidas futuras, especialmente si, además de las pérdidas directas, se consideran también los costes indirectos derivados de la interrupción en la actividad económica. Las evaluaciones cuantitativas del riesgo permitirán identificar las áreas donde se esperan las mayores pérdidas por deslizamientos y, por tanto, dónde se deberían dirigir las estrategias de mitigación para así obtener una mejor relación coste/beneficio.

Se ha desarrollado un procedimiento para evaluar, de forma cuantitativa, la peligrosidad y el riesgo por deslizamientos, el cual se ha aplicado a una zona de 140 Km² localizada en la parte inferior del valle del Deva, al noroeste de la provincia de Guipúzcoa (España). Este área fue elegida porque es particularmente apropiada para la aplicación de métodos estadísticos. La zona del Bajo Deva se caracteriza por estar afectada intensamente por deslizamientos (unos 3.000 inventariados desde 1954). Aproximadamente el 75 % de ellos son deslizamientos superficiales y flujos que afectan al regolito, con una superficie media de 500 m² y un volumen medio de 250 m³. Los principales agentes desencadenantes son los episodios de fuertes precipitaciones y, tanto directa como indirectamente, la actividad humana. La intensidad de los procesos naturales junto con la densa red de infraestructuras y de otros elementos expuestos hace que esta zona sea muy apropiada para aplicar el método propuesto.

La hipótesis subyacente es que el comportamiento experimentado en el pasado por los procesos de deslizamiento y sus efectos sobre los elementos humanos, se puede usar para obtener, mediante relaciones estadísticas, modelos que puedan ser utilizados para predecir la probabilidad futura de ocurrencia de deslizamientos y, en cierto grado, los daños. El objetivo principal de este trabajo ha sido desarrollar un procedimiento para evaluar el riesgo por deslizamientos basado en modelos probabilísticos de susceptibilidad y en modelos de peligrosidad, que incorporan una serie de escenarios que consideran el comportamiento del proceso en el futuro. Dichos escenarios suponen que la influencia humana, directa o indirecta, como factor desencadenante, probablemente, se incrementa en el futuro, como muestran las relaciones observadas en el pasado entre frecuencia de deslizamientos y factores socioeconómicos.

El procedimiento se ha iniciado con el desarrollo y evaluación de los modelos probabilísticos de susceptibilidad. El análisis de susceptibilidad se ha llevado a cabo a partir de la correlación existente entre los deslizamientos superficiales y una serie de parámetros relacionados con la inestabilidad: geometría del terreno, usos del suelo, geología, geomorfología, espesor de regolito y distancia a ríos y fallas. Los análisis de relaciones estadísticas se han realizado en el marco de las Funciones de Favorabilidad (FF). Para modelizar el comportamiento futuro de las laderas, ha sido también necesario considerar la magnitud de los deslizamientos. En este sentido, se ha definido un escenario que consideraba el tamaño medio de deslizamiento en el área de estudio y que ha sido utilizado en el análisis de susceptibilidad. Los modelos de susceptibilidad así obtenidos reflejan la probabilidad espacial de aparición de deslizamientos, la distancia de alcance y la magnitud.

La evaluación de los modelos se ha llevado a cabo mediante la comparación de los mapas de susceptibilidad generados a partir de deslizamientos pasados con los obtenidos con eventos no utilizados en el análisis anterior, siguiendo diferentes estrategias (deslizamientos ocurridos en varios lapsos temporales, separación de los eventos en muestras aleatorias y división de la zona de estudio en dos mitades). Las distintas estrategias ensayadas han mostrado que se obtienen curvas de predicción similares, lo cual ha servido para determinar la capacidad de predicción del modelo. El mejor modelo que se ha obtenido (predicción más precisa) ha sido el elaborado con la función "Likelihood ratio" utilizando como factores condicionantes: elevación, pendiente, orientación, litología, usos del suelo y espesor de regolito, y el inventario de deslizamientos 1991-1997. La capacidad de predicción de los modelos de susceptibilidad generados se ha visto incrementada si se compara con trabajos anteriores. Esto se atribuye, al menos en parte, al tratamiento de las variables numéricas como continuas y al incremento en la exactitud del MDE, así como al uso de variables de más calidad.

Los modelos de susceptibilidad de deslizamientos, que muestran la probabilidad espacial y se expresan en valores numéricos (1 a 200), han sido transformados en modelos de peligrosidad o de probabilidad espacio-temporal (expresados en probabilidad de 0 a 1) a partir de la evaluación de la frecuencia de deslizamientos en la zona de estudio. De esta forma, para estimar la probabilidad temporal, se han propuesto diferentes escenarios de frecuencia futura de deslizamientos, en términos del número de eventos que ocurrirán en un periodo dado (próximos 10 o 50 años). Esos escenarios de frecuencia futura de deslizamientos son: A) Número de deslizamientos en el futuro será igual al promedio de los que hubo en los últimos 50 años; B) Número de deslizamientos en el futuro se ajusta a una tendencia lineal de acuerdo con lo sucedido en los últimos 50 años; C) Número de

deslizamientos en el futuro se ajusta a una tendencia exponencial de acuerdo con lo sucedido en los últimos 50 años. Como la frecuencia de deslizamientos ha disminuido durante los últimos cuatro años analizados, sería razonable considerar otros escenarios que tuviesen en cuenta esa tendencia. En cualquier caso, este tipo de modelos de peligrosidad puede integrarse directamente con los mapas de elementos expuestos y de vulnerabilidad para generar modelos de riesgo, de acuerdo con la expresión, ampliamente usada, propuesta por Varnes, donde el riesgo es función de la peligrosidad, de los elementos expuestos y de la vulnerabilidad de dichos elementos.

Se han identificado y cartografiado diferentes elementos expuestos y se han creado las correspondientes bases de datos que incluyen infraestructuras, usos del suelo, edificios y actividades socioeconómicas. Debido al reducido tamaño de los deslizamientos en la zona de estudio, no se han registrado daños personales. Por tanto, la vulnerabilidad de las personas no se ha considerado en el presente trabajo.

El valor económico de los distintos elementos se ha obtenido a partir de consultas a personal de la administración, institutos de estadística, propietarios de terrenos y compañías constructoras, y se han representado en mapas expresados en €/píxel.

Se ha realizado un inventario sobre las pérdidas directas ocasionadas por los deslizamientos en los últimos 50 años. Como los datos recopilados son escasos, ha sido necesario hacer una serie de suposiciones y extrapolaciones para la evaluación de dichas pérdidas. Esto es particularmente significativo en el caso de las pérdidas indirectas. Mientras que las pérdidas directas en el pasado pueden obtenerse a partir de registros de daños, las pérdidas indirectas deben ser principalmente estimadas. No obstante, los gastos dedicados a reparaciones de daños por parte de los organismos correspondientes, además de otros indicadores, han sido utilizados para contrastar las pérdidas estimadas.

La vulnerabilidad para cada elemento (expresada de 0 a 1) se ha obtenido a partir de la comparación de los daños experimentados en el pasado por cada tipo de elemento (si el elemento es afectado por un deslizamiento) con el valor actual del elemento. Así se ha elaborado un mapa de vulnerabilidad para cada tipo de elemento considerado en el análisis. En el caso de los efectos indirectos, cada sector de carretera muestra las pérdidas indirectas potenciales esperables.

Cuando se produce un evento peligroso, los daños a elementos materiales tienen un efecto indirecto por interrupción de las actividades económicas. El concepto de daño indirecto es impreciso y difícil de evaluar. El procedimiento desarrollado ha intentado estimar las pérdidas potenciales indirectas debidas a la ocurrencia de un fenómeno dañino de una magnitud supuesta que afecta a la actividad económica. El principal efecto indirecto en la zona de estudio es la interrupción de las vías de comunicación, lo cual implica, fundamentalmente, la pérdida de actividad productiva, que se relaciona a su vez directamente con el número de personas afectadas.

Una vez que los mapas de peligrosidad, de vulnerabilidad y de valor han sido creados para los distintos elementos expuestos considerados, se han combinado, de acuerdo con la expresión $R = H * E * V$, para obtener un modelo de riesgo directo. Para cada tipo de elemento se ha elaborado un modelo de riesgo específico y la suma de todos ellos ha permitido generar el modelo de riesgo directo. Los modelos de riesgo generados para cada escenario de peligrosidad propuesto muestran, para cada píxel, las pérdidas monetarias

teóricas esperables, en los próximos 10 o 50 años en la zona del Bajo Deva, como consecuencia de los deslizamientos superficiales. Los modelos de riesgo indirecto se han generado previa multiplicación de los modelos de peligrosidad con los modelos de pérdidas indirectas potenciales. Todos los modelos se expresan en términos monetarios (€/píxel).

Finalmente, la suma de los modelos de riesgo directo e indirecto ha permitido obtener modelos de riesgo total de acuerdo con los escenarios de peligrosidad descritos. Los modelos de riesgo directo e indirecto tienen un significado diferente. Los modelos de riesgo directo muestran los daños a elementos localizados en cada píxel, mientras que las pérdidas indirectas generadas en un píxel no afectan al propio píxel, sino que tienen un área de afectación más amplia y no claramente definida. De todos modos, y dado que el riesgo se expresa en términos monetarios, ambos modelos se pueden sumar.

Los resultados obtenidos muestran que el procedimiento presentado y la hipótesis formulada son esencialmente correctos y que este método proporciona los medios para obtener modelos de riesgo en términos cuantitativos y monetarios, útiles para identificar las áreas donde dirigir los esfuerzos de mitigación de la peligrosidad y que sean más rentables. No obstante, la evaluación independiente de estos modelos no ha sido completamente satisfactoria y por esta razón, se han propuesto algunas vías para mejorar el procedimiento.

Finalmente, el potencial del método también ha sido ensayado para analizar otros tipos de riesgos geomorfológicos en un área de 50 Km², situada aguas abajo de la ciudad de Zaragoza en el NE de España, afectada por dolinas. Se ha realizado un análisis de la distribución espacial de dolinas y sus posibles factores causales (principalmente geomorfología, geología de superficie y subsuperficial, hidrogeología, actividades humanas y estructuras) para explorar la posible correlación entre estos factores y la distribución de dichas dolinas, es decir, elaborar modelos probabilísticos de susceptibilidad similares a los elaborados para los deslizamientos. Los resultados iniciales parecen prometedores indicando que estas técnicas resultan apropiadas para predecir este tipo de proceso. En el futuro, si se dispone de datos temporales sobre la ocurrencia de dolinas, será posible obtener modelos de peligrosidad de dolinas.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	vii
PRESENTACIÓN	xi
SUMMARY/RESUMEN	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática de los riesgos naturales	3
1.2 Consecuencias socio-económicas de los deslizamientos a nivel mundial	7
1.3 Consecuencias socio-económicas de los deslizamientos en España.....	19
1.4 Consideraciones finales	20
2. ACCIONES DESARROLLADAS PARA LA GESTION-MITIGACION DE RIESGOS NATURALES	23
2.1 Experiencias internacionales en la gestión de los riesgos naturales	30
2.2 Gestión de los riesgos naturales en Europa.....	31
2.2.1 Gestión de los riesgos naturales en España.....	36
2.3 Situación de las cartografías de riesgos en España	41
2.4 Consideraciones finales	43
3. ANTECEDENTES SOBRE LA EVALUACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO POR DESLIZAMIENTOS	45
3.1 Evaluación de la amenaza	50
3.1.1 Métodos de elaboración de cartografías de peligrosidad	52
3.1.1.1 Principales imitaciones de los métodos probabilísticos.....	53
3.2 Elementos expuestos.....	55
3.3 Vulnerabilidad.....	56
3.4 Riesgo	59
3.4.1 Evaluación del riesgo originado por distintos procesos.....	60
3.4.2 Evaluación del riesgo por deslizamientos.....	63
3.5 Consideraciones finales	76

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	77
5. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS	83
6. METODOLOGÍA	89
6.1 La expresión matemática del riesgo	92
6.2 Desarrollo de la metodología de trabajo.....	95
6.3 Descripción y selección del área de estudio	97
6.3.1 Justificación	97
6.3.2 Características generales.....	97
6.3.2.1 Marco geográfico	97
6.3.2.2 Marco climático	98
6.3.2.3 Marco geológico	99
6.3.2.4 Marco socioeconómico	100
6.4 Toma y preparación de datos	105
6.4.1 Datos relacionados con el análisis de la peligrosidad.....	106
6.4.1.1 Hipótesis de rotura	106
6.4.1.2 Series de deslizamientos	107
6.4.1.3 Factores condicionantes.....	109
6.4.1.3.1 Variables continuas	110
6.4.1.3.2 Variables categóricas.....	111
6.4.2 Datos relacionados con el análisis de los elementos expuestos.....	112
6.4.2.1 Infraestructuras	113
6.4.2.2 Edificios.....	115
6.4.2.3 Terrenos o usos del suelo.....	115
6.4.3 Datos relacionados con el análisis del valor y daños en los elementos expuestos.....	116
6.4.3.1 Datos relacionados con el análisis de pérdidas en la actividad económica.....	117
6.4.3.2 Datos relacionados con el análisis de pérdidas en la población	118
6.4.4 Representación gráfica de los elementos.....	118
6.5 Análisis de los datos.....	119
6.5.1 Estimación de la susceptibilidad y de la peligrosidad	119
6.5.1.1 Elaboración de los modelos de susceptibilidad	119
6.5.1.1.1 Funciones de Favorabilidad (FF)	121
6.5.1.1.1.1 FF interpretada como una relación de probabilidades	122
6.5.1.1.2 Obtención del modelo de susceptibilidad.....	125
6.5.1.1.3 Estrategias de validación/evaluación de resultados.....	127

6.5.1.1.3.1	Curvas de validación	129
6.5.1.2	Procedimiento semiautomático para elaborar modelos de susceptibilidad	130
6.5.1.3	Elaboración de modelos de peligrosidad o de probabilidad espacio-temporal ...	132
6.5.1.3.1	Escenarios propuestos en la evolución temporal de deslizamientos	132
6.5.2	Estimación de la vulnerabilidad	135
6.5.2.1	Estimación de la vulnerabilidad directa	135
6.5.2.2	Estimación de las pérdidas indirectas.....	136
6.5.3	Estimación del riesgo por deslizamientos.....	140
6.5.3.1	Estimación del riesgo directo	140
6.5.3.2	Estimación del riesgo indirecto	142
6.5.3.3	Estimación del riesgo total	142
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	143
7.1	Resultados en relación con la susceptibilidad	145
7.1.1	Relación de los deslizamientos con los factores desencadenantes	146
7.1.2	Relación de los deslizamientos con los factores condicionantes	149
7.1.3	Modelos de susceptibilidad obtenidos: técnicas estadísticas y variables utilizadas ...	161
7.1.3.1	Validación de los modelos de susceptibilidad: fiabilidad y capacidad de predicción	168
7.2	Resultados en relación con la peligrosidad	173
7.2.1	Modelos de peligrosidad obtenidos	173
7.2.1.1	Frecuencia de deslizamientos	173
7.2.1.1.1	Escenarios de peligrosidad o de probabilidad espacio-temporal	173
7.2.1.1.1.1	Probabilidad a 50 años.....	175
7.2.1.1.1.2	Probabilidad a 10 años.....	179
7.2.1.1.2	Justificación de la determinación de tendencias, extrapolación y formulación de escenarios.....	182
7.3	Resultados en relación con los elementos expuestos	191
7.3.1	Infraestructuras.....	191
7.3.1.1	Estimación de daños potenciales	191
7.3.1.2	Estimación del valor del tipo de infraestructura	195
7.3.2	Edificios	195
7.3.2.1	Estimación de daños potenciales	195
7.3.2.2	Estimación del valor del edificio	196
7.3.3	Usos del suelo	196
7.3.3.1	Estimación de daños potenciales	196
7.3.3.2	Estimación del valor del tipo de uso del suelo	198

7.4 Resultados en relación con la vulnerabilidad	200
7.4.1 Vulnerabilidad directa o pérdidas directas	200
7.4.2 Vulnerabilidad indirecta o pérdidas indirectas	203
7.5 Resultados en relación con el riesgo.....	208
7.5.1 Modelos de riesgo específico	208
7.5.1.1 Modelos de riesgo específico para infraestructuras	208
7.5.1.2 Modelos de riesgo específico para edificios	211
7.5.1.3 Modelos de riesgo específico para usos del suelo	211
7.5.2 Modelos de riesgo directo	213
7.5.3 Modelos de riesgo indirecto	216
7.5.4 Modelos de riesgo total	219
7.5.5 Evaluación de los modelos de riesgo	222
7.6 Aplicación de los modelos probabilísticos a los procesos de disolución en evaporitas ...	225
7.6.1 Los procesos de disolución y hundimiento en evaporitas	226
7.6.2 Hipótesis de trabajo	226
7.6.3 Características del área de estudio	227
7.6.3.1 Marco geográfico	227
7.6.3.2 Marco geológico-geomorfológico	227
7.6.4 Toma y preparación de datos	229
7.6.4.1 Identificación y cartografía de dolinas.....	229
7.6.4.2 Identificación y cartografía de factores condicionantes.....	231
7.6.5 Análisis y elaboración de los modelos de susceptibilidad	232
7.6.5.1 Problemas planteados en la elaboración de los modelos de susceptibilidad	233
7.6.5.2 Obtención de modelos de susceptibilidad de dolinas	233
7.6.5.3 Evaluación de la capacidad predictiva de los modelos de susceptibilidad de dolinas	242
7.6.6 Consideraciones finales.....	243
7.7 Metadatos.....	244
8. CONCLUSIONS/CONCLUSIONES	245
BIBLIOGRAFÍA.....	259
ANEXOS	279
Anexo I.....	281
Anexo II	301