

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



CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES SOBRE LA EVALUACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO POR DESLIZAMIENTOS

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES SOBRE LA EVALUACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO POR DESLIZAMIENTOS

Tal como se ha comentado anteriormente (Capítulo 1) existe una clara tendencia al aumento de la peligrosidad por deslizamientos (sobre todo en las últimas décadas), fundamentalmente debida al incremento de la frecuencia de los deslizamientos (Larsen & Torres-Sánchez, 1998; Reid, 1998; Guthrie, & Evans, 2004; Remondo et al., 2005c), mientras que la distribución espacial de los mismos tiende a manifestarse casi siempre en unas zonas concretas (de mayor susceptibilidad) (Remondo et al., 2005c). También es evidente que ha aumentado (y previsiblemente seguirá aumentando) la exposición (Gendreau et al., 2000; Alcántara-Ayala, 2002), al existir cada vez más población, edificios, infraestructuras y actividades económicas sobre cualquier territorio. Menos evidente es la variación de la vulnerabilidad, si bien parece presentar, a nivel global, una tendencia al aumento (Figura 3.1; Briceño, 2004). El resultado neto, tal como se ha mostrado en la Figura 1.4, es un marcado aumento del riesgo (daños).

Esta situación ha llevado, entre otras iniciativas, a que la Comisión Europea, dentro de su programa *European programme on climatology and natural hazards* (EPOCH) o *Environment and Climate, etc.*, haya financiado una serie de proyectos relacionados con el estudio de los deslizamientos, entre los que podríamos destacar algunos como: *The temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community* (Casale et al., 1994), *The Temporal Stability and Activity of Landslides in Europe with Respect to Climatic Change- TESLEC* (Dikau et al., 1996b), *Meteorological factors influencing slope stability and slope movement type: evaluation of hazard prone areas-MEFISST* (Delmonaco et al., 1998), *New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe-NEWTECH* (Corominas et al., 1998), *Forecasting the collapse and runout of giant, catastrophic landslides-RUNOUT* (Kilburn & Pasuto, 2003), *Impact of large Landslides in the mountain environment: identification and mitigation of risk-IMIRILAND* (Bonnard et al., 2004), *Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas-ALARM* (Marcato et al., 2005). En los tres primeros se analizó la ocurrencia temporal de movimientos en masa y el papel desempeñado por los factores desencadenantes y condicionantes. Además en el TESLEC se elaboró un manual para el reconocimiento y caracterización de estos procesos (Dikau et al., 1996a). En el NEWTECH se desarrollaron técnicas de cartografía de susceptibilidad. Los tres últimos se han centrado en el desarrollo de métodos para calcular y minimizar el riesgo. En este sentido, el proyecto GETS (programa TMR de la Comisión Europea), ha desarrollado una metodología para incorporar el análisis del riesgo por deslizamientos a los estudios de impacto ambiental (Bonachea et al., 2005).

En España, la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), dentro del Plan Nacional I+D 1996-2000, ha financiado proyectos relacionados con deslizamientos como GISLYT (Ayala & Corominas, 2002) donde se presentan metodologías para estimar la

peligrosidad mediante técnicas SIG, o el proyecto FODISPIL (dentro del Programa Nacional I+D+i, 2002-2005) en el que se aplican técnicas de fotogrametría de alta resolución para detectar las zonas de rotura y mejorar los modelos de susceptibilidad (González-Díez et al., 2004), entre otros.

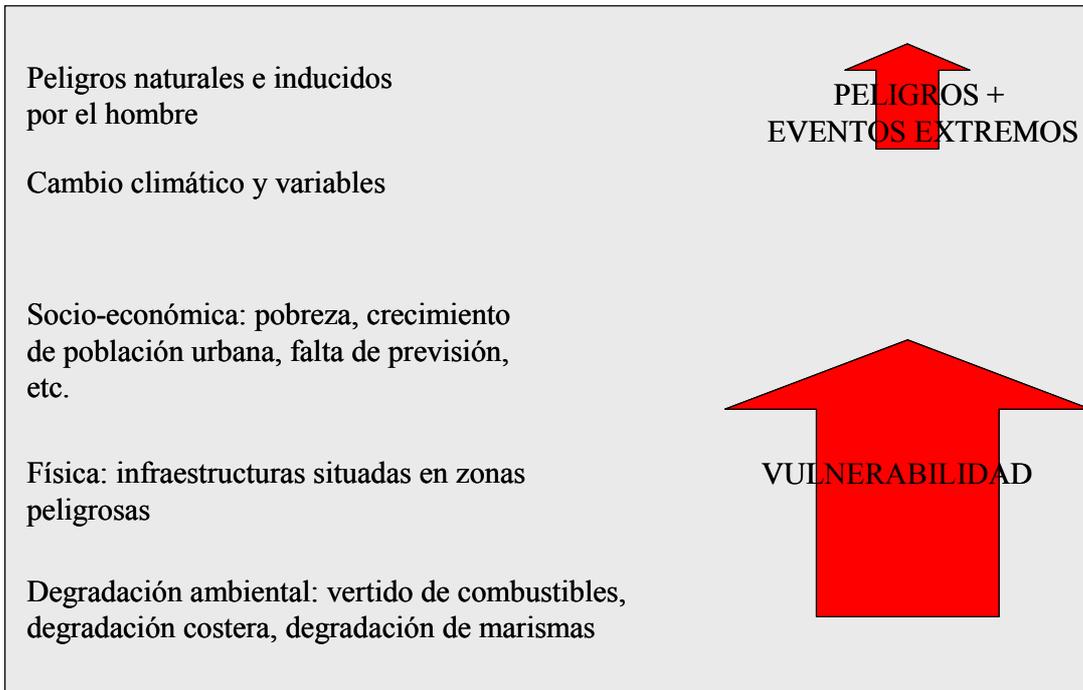


Figura 3.1. Tendencias globales de los componentes del riesgo. La tendencia general es hacia más y más desastres, con menos muertes, pero con un número mayor de damnificados y de pérdidas económicas.

Por otro lado, se han llevado a cabo congresos internacionales, como los *International Symposia on Landslides*, celebrados cuatrienalmente desde los años 70 (Tokio, Kyoto, New Delhi, Toronto, Lausanne, Christchurch, Trondheim, Cardiff, Río de Janeiro), las *International Conferences on Landslide Risk Management* o las *General Assemblies* de la Unión Europea de Geociencias (EGU) donde se abordan con intensidad los riesgos de deslizamiento. También a nivel nacional, en los Simposia Nacionales sobre Taludes y Laderas Inestables y en las Reuniones Nacionales de Geomorfología se ha tratado este proceso.

La clasificación del territorio en zonas de distinta peligrosidad o riesgo se ha abordado por parte de muy diversos autores y de formas bastante variadas. La diversidad de enfoques y de metodologías ha dado lugar a cartografías con sentidos muy distintos y de difícil estandarización, dado que en general se han concebido para aplicaciones específicas (Hansen, 1984). Los distintos enfoques seguidos, como se comenta a continuación, tratan de hacer pronósticos con respecto a la futura interacción entre procesos de deslizamiento y elementos humanos (vidas y bienes materiales), lo cual requiere, de una u otra forma, el análisis del comportamiento pasado así como el desarrollo y validación de modelos.

A pesar de la gran cantidad de trabajos existentes, son escasos, como se verá, los que abordan de manera explícita la obtención de mapas de riesgo, y todavía menos los que lo hacen de manera cuantitativa. Sin embargo, dado que los deslizamientos generan gran cantidad de daños, parece claro que es necesario desarrollar herramientas que permitan estimar las pérdidas futuras producidas por este proceso natural y ayuden a poner en

práctica medidas de reducción de daños, para evitar o disminuir tales pérdidas. Las herramientas más adecuadas para conseguir estos propósitos son los modelos de riesgo. En el uso práctico de metodologías para realizar mapas de riesgo ha habido pocos avances, sobre todo en lo que se refiere a estimaciones de pérdidas económicas futuras, a pesar de que, al menos desde el punto de vista conceptual, se conocen los distintos factores que intervienen en la evaluación del riesgo (Figura 3.2): peligrosidad o *hazard*, exposición o *exposure*, vulnerabilidad o *vulnerability* y, riesgo o *risk* (Varnes, 1984; UNDRO, 1991; Ayala, 1993; Fell & Hartford, 1997). Esto es así porque existen dificultades para obtener los datos necesarios para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo y, además, porque están poco desarrollados los procedimientos para pasar de la formulación conceptual a la aplicación de herramientas que permitan expresar, de forma práctica y cuantitativa, esos conceptos.

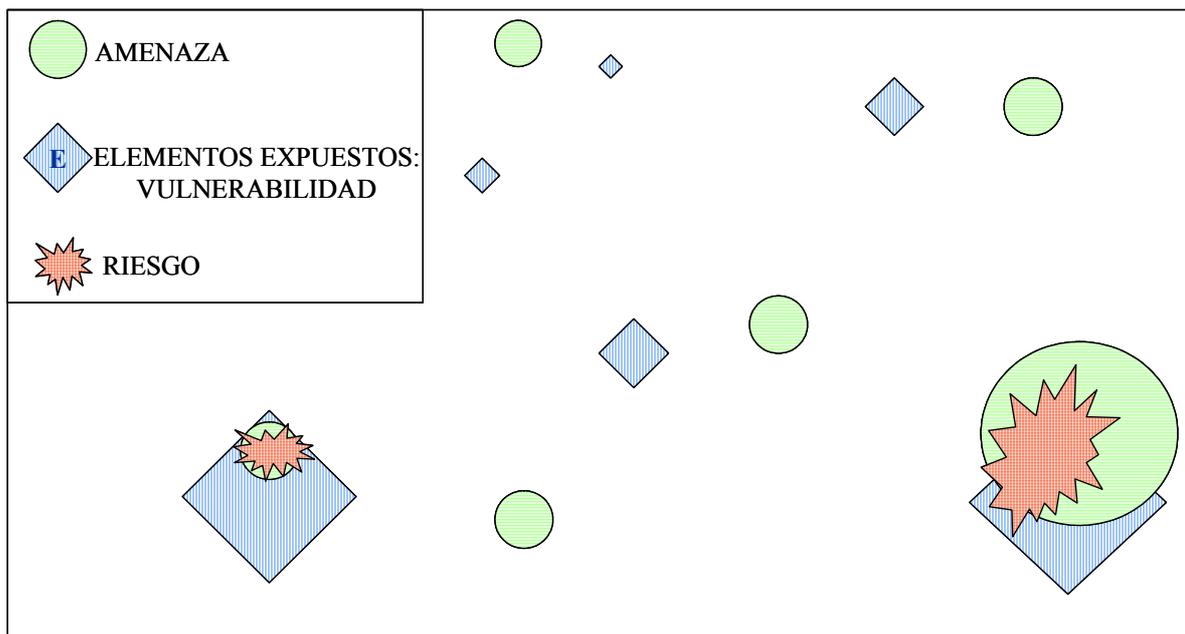


Figura 3.2. Representación de los factores que intervienen en la expresión del riesgo. La intersección de amenaza, elementos expuestos y vulnerabilidad, da lugar al riesgo.

El desarrollo de procedimientos para evaluar la amenaza y el riesgo por deslizamientos se produce sobre todo a partir de inicios de la década de los 70. De esas fechas es, por ejemplo, la cartografía ZERMOS (Humbert, 1977; Champetier de Ribes, 1987; Leroi, 1996). De la misma época es el fundamental trabajo de Varnes (1978). Este autor propuso una clasificación basada en el tipo de movimiento y de material implicado, así como de su velocidad. Varnes (1978), define los deslizamientos como “un movimiento, hacia abajo y hacia fuera, de los materiales que forman las laderas compuestas por rocas, suelos, derrubios o rellenos artificiales”. Posteriormente, Varnes (1984) extiende el concepto de deslizamiento a casi todas las tipologías de movimientos en masa producidos en laderas, incluyendo procesos como caídas, vuelcos o flujos de derrubios. Existen muchas otras propuestas de clasificación de los deslizamientos (Dana, 1864; Sharpe, 1938; Terzaghi & Peck, 1948; Brunsden & Prior, 1984; Hutchinson, 1988; Cruden, 1991; Casale et al., 1994; Cruden & Varnes, 1996; Dikau et al., 1996a) pero todas ellas combinan, de una u otra forma, los criterios antedichos.

En este trabajo se utiliza el esquema de clasificación de deslizamientos y terminología presentado en el proyecto TESLEC (Dikau et al., 1996b), a su vez inspirados en Varnes (1978, 1984). En lo que se refiere a la interacción con los elementos humanos, la

terminología que en este trabajo se adopta es la propuesta por UNDRO (1991) e incorporada por el proyecto ALARM (Marcato et al., 2005), donde, en la estimación del riesgo por deslizamientos se considerará la evaluación de la amenaza, teniendo en cuenta la probabilidad espacio-temporal y la intensidad de que se produzca un movimiento y, también, el análisis de los elementos afectables y su vulnerabilidad.

En las últimas tres décadas se han dedicado bastantes esfuerzos a desarrollar metodologías para elaborar modelos de susceptibilidad de deslizamientos (Brabb et al., 1972; Carrara, 1983; Hansen, 1984; Corominas, 1987; Carrara et al., 1991; Chung & Fabbri, 1993; Chung et al., 1995; Van Westen et al., 1997; Vanacker et al., 2003). Estos modelos se basan, principalmente, en que en la aparición de los deslizamientos influyen factores muy diversos (Palmquist & Bible, 1980; Varnes, 1984; Hutchinson, 1988; Turner & Schuster, 1995; González-Díez et al., 1999; Zêzere et al., 1999), que en la mayoría de los casos son bastante difíciles de modelizar. Entre dichos factores se incluyen los factores desencadenantes (originan la inestabilidad) como son: sismicidad, incisión fluvial, precipitaciones o actividad humana; y los condicionantes (favorecen la inestabilidad) entre los que cabe destacar: geometría, saturación de agua, geología, vegetación, etc. Los modelos así generados sólo son extrapolables a otras zonas siempre y cuando en ese territorio se produzca el mismo tipo de movimiento y bajo unas condiciones (de variables) determinadas, similares a las que se utilizaron para generar el modelo. Los resultados que ofrecen los modelos de susceptibilidad predicen bastante bien el lugar donde se espera se produzcan nuevos deslizamientos, pero existen aún ciertas incertidumbres que se deben resolver, y que permitiría mejorar su capacidad predictiva.

Mucho menos frecuente es el análisis de la vulnerabilidad. En el trabajo desarrollado por Leone et al. (1996), se aborda de forma exhaustiva el tipo de elementos sometidos a riesgo y la vulnerabilidad de cada uno de ellos. Sin embargo, su aplicación a otras áreas es compleja, ya que se necesita disponer de datos de mucho detalle y, a veces, subjetivos.

Existen ejemplos de mapas de riesgo por deslizamientos (Cendrero et al., 1987a; Bernknopf et al., 1988; Leroi, 1996), pero, generalmente, son de carácter cualitativo, obtenidos a partir de criterios de experto y donde no se representa la probabilidad temporal de aparición de movimientos. Sin embargo, el análisis del riesgo por deslizamientos, desde un punto cuantitativo de estimación de daños futuros, no ha recibido mucha atención (Carrara et al., 1991; Chacón et al., 1994; Mejía-Navarro et al., 1994; Leone et al., 1996; Glade et al., 2005), probablemente debido a las incertidumbres que se plantean a la hora de realizar predicciones (por falta de datos sobre el futuro comportamiento de los procesos geomorfológicos, de daños pasados o de futuros elementos en riesgo). Algunos ejemplos de metodologías, de carácter cuantitativo, de análisis de riesgo por deslizamientos se presentan en Bell & Glade (2004), Bonachea et al. (2004) y Remondo et al. (2005a). Estas metodologías son, en principio, extrapolables a otras áreas, dado que el procedimiento que aplican es lo suficientemente objetivo como para ser reproducido.

3.1 Evaluación de la amenaza

De acuerdo con la definición adoptada por UNDRO (1991) la peligrosidad o amenaza natural (*Hazard*) se define como “*the probability of occurrence, within a specific period of time in a given area, of a potentially damaging natural phenomenon*”. Por tanto, la evaluación de la peligrosidad implica localizar las áreas inestables y las potencialmente inestables. Esto, a su vez, requiere determinar el tipo de los movimientos en masa, su

magnitud y posible desplazamiento ladera abajo, así como los factores relacionados con la estabilidad y su contribución a la inestabilidad. Por otro lado, es preciso estimar la frecuencia de ocurrencia en el tiempo, es decir, intentar predecir lo que puede ocurrir en un periodo no muy lejano. La posibilidad de hacer predicciones fiables sobre el comportamiento futuro de los deslizamientos dependerá del:

- conocimiento detallado de su comportamiento en el pasado (archivos históricos, estudios geomorfológicos, etc.), ya que los movimientos, se supone, que se producirán bajo condiciones similares a las que produjeron deslizamientos en el pasado y los producen en el presente (Principio del Uniformitarismo).
- conocimiento de la dinámica del deslizamiento (factores que intervienen, variables a considerar, relaciones entre variables causales y efectos, etc.).

Un buen conocimiento de los aspectos anteriores permitirá el desarrollo de modelos predictivos de susceptibilidad y de peligrosidad. La susceptibilidad hace referencia a la predisposición del terreno de verse afectado por deslizamientos, no teniendo en cuenta el factor tiempo. Durante mucho tiempo se ha utilizado indistintamente el término susceptibilidad y peligrosidad para referirse a los mapas de amenaza. En la actualidad ese término se utiliza para designar zonas que son más o menos propensas a deslizar. En los últimos años, como consecuencia del desarrollo de los ordenadores y de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la generación de modelos de susceptibilidad y amenaza por deslizamientos (Carrara et al., 1991; Chung & Fabbri, 1993; Van Westen, 1993; Irigaray, 1995; Baeza & Corominas, 2001; Remondo, 2001; Santacana, 2001; Fabbri et al., 2003; Vanacker et al., 2003), ha experimentado un importante avance, gracias al uso de técnicas de análisis de datos espaciales.

Los deslizamientos pueden ser modelizados mediante modelos físicos y estadísticos. La búsqueda de correlaciones estadísticas entre factores condicionantes (vegetación, litología, pendiente, etc.) o desencadenantes (precipitaciones, sacudidas sísmicas, actividad humana, etc.) y la ocurrencia de los procesos, permite generar modelos de susceptibilidad a los deslizamientos. Así, se han podido obtener modelos de probabilidad espacial bastante satisfactorios, de acuerdo con su validación independiente (Chung & Fabbri, 1999; Remondo, 2001; Santacana, 2001; Zêzere, 2002; Remondo et al., 2003a, b). Evidentemente, la capacidad predictiva de los modelos depende de la calidad de las variables independientes. En este sentido, se está trabajando en el análisis de la influencia de la exactitud/resolución de las variables del terreno en la calidad de la predicción (Olague et al., 2005).

La modelización de la progresión de la masa deslizada suele abordarse mediante los modelos dinámicos aplicados a deslizamientos; se utilizan con frecuencia en estudios sobre "*debris flows*" (Mark & Ellen, 1995; Chen & Lee, 2000; Van Asch et al., 2004) y en caídas de rocas (Spang & Sönser, 1995; Crosta & Agliardi, 2004) donde se han desarrollado programas informáticos específicos (Eurobloc, Rockfall, Rotomap, etc.) que simulan las posibles trayectorias seguidas por los bloques. Esto se debe a que generalmente sólo se aplican a un deslizamiento concreto y en una zona concreta, por lo que su uso a escala regional es complicado. Estos modelos se basan en las propiedades físicas de las laderas y de los materiales que implican en su recorrido, por lo que requieren una importante inversión en tiempo y en dinero, que en el caso de los métodos estadísticos es mucho menor.

También, ha habido intentos de desarrollar modelos determinísticos de estabilidad de laderas, los cuales resultan bastante fiables cuando se analizan zonas muy concretas (Van Westen, 1993; Terlien et al., 1995; Luzi & Pergalani, 1996), para las que se dispone de información geotécnica detallada.

Estos tipos de modelos proporcionan la base para llevar a cabo una evaluación y cartografía de la peligrosidad.

3.1.1 Métodos de elaboración de cartografías de peligrosidad

La mayoría de las cartografías de amenaza de deslizamientos representan en realidad la susceptibilidad del terreno, es decir, la “probabilidad espacial” de que ocurran deslizamientos, sin analizar el factor temporal o cuándo se producirán esos movimientos. Esto es, los modelos de susceptibilidad indican qué zonas del territorio analizado tienen mayor o menor propensión a sufrir deslizamientos, pero no nos informan sobre la probabilidad de ocurrencia en el tiempo de los mismos. Por tanto, es necesario diferenciar entre modelos de susceptibilidad y de peligrosidad, a pesar de que los términos se utilicen con frecuencia de forma indistinta. Para obtener dichas cartografías se han utilizado tanto métodos directos como indirectos:

- Métodos directos o empíricos: son métodos que acuden a la simple representación, a modo de inventario, de los movimientos ocurridos en el pasado basándose en criterios principalmente geomorfológicos. La experiencia del operador es importante a la hora de tipificar el movimiento y representar espacialmente su desarrollo para reducir errores en la cartografía. Evidentemente, la idea subyacente es que las áreas afectadas por el proceso en el pasado son las que tienen mayor probabilidad de experimentarlo en el futuro. Este tipo de mapas se realizan habitualmente como base para trabajos de mayor detalle (mapas geomorfológicos) y para delimitar las zonas más peligrosas. Algunos ejemplos de este tipo de métodos lo constituyen Brunsden et al., (1975), Humbert (1977), Hansen (1984) y González-Díez (1995).

Entre los métodos indirectos pueden destacarse:

- Métodos determinísticos: se utilizan principalmente en el campo ingenieril para determinar la estabilidad de un talud o ladera (Brunsden & Prior, 1984; Bromhead, 1996), donde las condiciones geomorfológicas y geológicas son homogéneas, y donde se pueden aplicar las leyes físicas necesarias para aplicar los modelos de estabilidad, hidrológicos, etc. Tienen el inconveniente de que su aplicación a grandes áreas es muy costoso lo que les hacen económicamente inviables; sin embargo, ha habido intentos de aplicarlos a grandes áreas (Van Westen, 1993; Terlien et al., 1995). Las escalas de trabajo son en general de 1/5000 o de mayor detalle.
- Métodos heurísticos: se basan en criterios de experto para clasificar el mapa en clases de peligrosidad, por lo que la subjetividad inherente a su elaboración (como consecuencia de la asignación de pesos) es un aspecto importante a tener en cuenta. Estos métodos consideran los factores que influyen en la inestabilidad mediante asignación de pesos o criterios de experto (Tamés et al., 1986; Cendrero et al., 1987b; Carrara et al., 1995). La escala de trabajo suele oscilar entre 1/100000 y 1/5000.

- Métodos estadísticos o probabilísticos: Se trata de métodos , que permiten establecer relaciones estadísticas a partir de distintos métodos, entre una serie de factores condicionantes de los deslizamientos como la litología, pendiente, etc. y la distribución actual y/o pasada de los deslizamientos, a escalas de trabajo entre 1/10000 y 1/5000 (Van Westen, 1993; Carrara et al., 1995; Chung et al., 1995; Dai & Lee, 2002; Fabbri et al., 2003; Remondo et al., 2003a). Su uso requiere crear una base de datos que incluya toda esa información. El trabajo que aquí se presenta se basa en la utilización de este tipo de métodos, los cuales facilitan la obtención de modelos de susceptibilidad.

Una revisión detallada de la elaboración de cartografías de deslizamientos a partir de diferentes métodos puede encontrarse en Soeters & Van Westen (1996), Aleotti & Chowdhury (1999), Guzzetti et al., (1999), Remondo (2001), Santacana (2001) y Van Westen (2004).

3.1.1.1 Principales limitaciones de los métodos probabilísticos

Los métodos cartográficos presentan ciertas limitaciones entre las que cabe destacar:

- La simplificación de los datos de entrada implica una cierta limitación en los resultados debido a la pérdida del detalle en las variables utilizadas.
- A veces, no se consideran todas las variables que pueden actuar como factores condicionantes de los deslizamientos.
- La integración de variables categóricas y de variables continuas es compleja y si se categorizan éstas últimas, ello implica la pérdida de información al producirse una generalización de valores en un entorno bastante amplio.
- En muchos casos, es preciso hacer una serie de suposiciones, que son puntos débiles en la generación de modelos, como por ejemplo considerar las mismas condiciones de ciertas variables en el pasado, en la actualidad y en el futuro (por ejemplo, en el caso de los usos del suelo).
- Muchos de los modelos propuestos no se han validado, por lo que su capacidad de predicción es dudosa. La validación es esencial para comprobar el funcionamiento y precisión de los modelos generados.
- Cuando se dispone sólo de modelos de susceptibilidad (no de modelos de peligrosidad), éstos no se pueden utilizar en los análisis de riesgo. Esta circunstancia viene motivada por la dificultad de incorporar a los análisis de peligrosidad factores tales como tiempo, intensidad o magnitud y alcance de las masas deslizadas, que juegan un papel importante en la estimación de la peligrosidad, vulnerabilidad y, por tanto, del riesgo (Leroi, 1996; Dai et al., 2002; Bonachea et al., 2004).

Los problemas para incorporar la dimensión temporal en este tipo de análisis (imprescindible para obtener mapas de peligrosidad que representen la probabilidad de ocurrencia en cada punto o unidad del territorio analizado) se derivan de la dificultad para obtener datos suficientes, sobre el desarrollo del proceso en periodos del pasado reciente, que resulten significativos para la realización de previsiones encaminadas a la prevención de daños. Estas previsiones hacia el futuro deben abarcar, por lo menos, unas cuantas

décadas, por lo que el periodo pasado a analizar debería corresponder a un intervalo temporal similar.

Para estos intervalos temporales, los procedimientos de obtención de datos que se pueden utilizar son:

a) Registros y archivos de eventos pasados existentes en hemerotecas, o bien recogida de datos, mediante entrevistas, entre los habitantes del lugar. Estos registros presentan, en general, una cobertura incompleta, ya que suelen limitarse a deslizamientos que hayan producido daños, por lo que tienen un fuerte sesgo hacia las zonas habitadas o con infraestructuras (Ibsen & Brunnsden, 1996) mientras que los movimientos que se producen en el resto del territorio no se suelen incluir.

b) Inventarios basados en fotografías aéreas y/o imágenes de satélite. Estos procedimientos proporcionan una buena cobertura espacial de todo el territorio a analizar, pero presentan con frecuencia problemas de resolución espacial (especialmente las fotos o imágenes más antiguas) y también de resolución temporal. Normalmente, las fotografías aéreas suelen tener frecuencias variables (bianuales o quinquenales) aunque lo típico es encontrarse con vuelos cuyo intervalo abarca varios años. La periodicidad es mucho mayor en el caso de las imágenes de satélite, sobre todo en las épocas más recientes, pero éstas, salvo para las imágenes de ciertos satélites (Ikonos o Quickbird), tienen una resolución poco satisfactoria (Mantovani et al., 1996; Singhroy & Mattar, 2000).

c) Los procedimientos de datación: entre los que destacan los liquenométricos (Innes, 1983; Winchester & Harrison, 1994), dendrocronológicos (Moya et al., 1992; Corominas et al., 2004) e isotópicos (Cs^{137} ; Schoeneich, 1991; Soto et al., 2002). Estos procedimientos en la práctica se pueden aplicar a un número limitado de deslizamientos, dada la dificultad de obtener muestras representativas que sirvan para el análisis. La combinación de los métodos anteriores junto con otros morfométricos y cronoestratigráficos permiten cubrir poblaciones de movimientos datados en zonas más o menos extensas (González-Díez, 1995; González-Díez et al., 1999). No obstante, existe una enorme dificultad para poder aplicar en áreas extensas el mismo método de datación a todos los movimientos de ladera presentes. Una revisión de los distintos métodos de datación de deslizamientos se describe en Lang et al. (1999).

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 (Hung, 1997), e incluye parámetros tales como velocidad, energía del movimiento, volumen o espesor de la masa en desplazamiento (Varnes, 1984; Cruden & Varnes, 1996; Aleotti & Chowdhury, 1999; Crozier, 1999; Cardinali et al., 2002). De forma cualitativa se expresa como baja, moderada y alta, pero también se puede expresar de forma cuantitativa como: velocidad en ms^{-1} , volumen o energía liberada. Dichos parámetros se pueden estimar de manera semicuantitativa para deslizamientos pasados, pero resulta difícil hacer previsiones sobre cual será esa magnitud en un movimiento futuro. Se han propuesto algunos modelos para el cálculo de la distancia de alcance de deslizamientos de gran volumen (Corominas, 1996; Hung & Evans, 1996; Finlay et al., 1999), pero éstos son aplicables a deslizamientos específicos (como en el caso de las caídas de rocas), sin que puedan extrapolarse a otros. Existen ejemplos de modelos aplicados a distintos tipos de movimientos como son las caídas de bloques, vuelcos, flujos y deslizamientos

superficiales; pero todos ellos tienen limitaciones derivadas de la dificultad de predecir la cantidad de material que se liberará en cada punto potencialmente afectable e incluso, la naturaleza, velocidad y alcance del movimiento (Dijke & Van Westen, 1990; Hungr, 1995; IUGS Working group on landslides, Committee on Risk Assessment, 1997; Furdada & Vilaplana, 1998; Copons et al., 2000; Dorren et al., 2006).

Ante las dificultades descritas para la incorporación de los aspectos citados en los análisis de peligrosidad, se pueden proponer algunas vías a seguir, para mejorar los mapas al uso. Una de ellas, va encaminada a mejorar la incorporación del factor tiempo sobre la base de análisis temporales retrospectivos de poblaciones numerosas de deslizamientos. Aunque la resolución temporal de dichos análisis no sea óptima, si pueden permitir la formulación de ciertas hipótesis o escenarios bien fundamentados sobre el comportamiento futuro (Remondo et al., 2005a). Este tipo de aproximación es la que se plantea en este trabajo.

El análisis retrospectivo de un número significativo de deslizamientos permite también caracterizar de manera fiable el rango de intensidad, magnitud y alcance dentro de los que se sitúan la mayoría de los mismos. Eso hace posible plantearse diferentes situaciones de comportamiento futuro para los distintos puntos potenciales de ruptura, que podrían corresponder a un escenario promedio (media de la población), máximo (equivalente al percentil 90) o mínimo (percentil 10). Esto, como se discute más adelante, puede permitir una mejora en la cuantificación de los análisis de peligrosidad y riesgo, y también evaluar la calidad de las predicciones realizadas.

Idealmente, deberíamos ser capaces de mejorar la precisión en la predicción de los futuros deslizamientos en una zona dada, así como en la determinación del tipo, volumen, velocidad y alcance de los movimientos. Esto es, deberíamos tratar de ligar los modelos de ruptura (fundamentalmente probabilísticos), que proporcionan pronósticos aceptables (aunque sin duda mejorables) sobre la distribución de la actividad futura en una zona, con modelos que permitan simular la progresión de la masa deslizada (fundamentalmente modelos determinísticos).

Cuanto mejor desarrollados estén los modelos comentados, independientemente del método utilizado, mejores serán las predicciones obtenidas en relación con la amenaza y la intensidad de los daños provocados. Estas predicciones resultarán muy útiles para orientar el desarrollo de medidas de prevención/mitigación de cara a reducir los daños potenciales de este proceso. Por otra parte, también resultarán útiles para calcular el riesgo futuro y estimar las zonas donde se producirán las mayores pérdidas.

3.2 Elementos expuestos

Otro de los parámetros que intervienen en el riesgo es la exposición (*exposure*), especialmente el valor de los elementos expuestos o en riesgo. Los movimientos en masa o deslizamientos provocan numerosos daños sobre los principales elementos expuestos, tanto en vidas humanas como en pérdidas económicas (González de Vallejo, 1988; Brabb & Harrod, 1989; Schuster, 1996; Evans, 1999; Guzzetti, 2000; EM-DAT, 2005).

UNDRO (1991) define la exposición como “*the population, buildings and civil engineering works, economic activities, public services, utilities and infrastructure, etc., at risk in a given area*”. Tanto Varnes (1984) como UNDRO (1991) consideran en la

expresión del riesgo ($R = H \times E \times V$) a los elementos, pero en ningún momento se indica cómo incorporarlos a dicha expresión.

Casi todos los autores están de acuerdo a la hora de considerar los elementos que se ven afectados por deslizamientos, puesto que se tienen abundantes datos sobre los elementos que han sido afectados en el pasado. No obstante, cada autor estima de forma diferente la manera de tratar los distintos tipos de elementos, como más adelante se verá al considerar la vulnerabilidad, ya que elementos expuestos y vulnerabilidad están directamente relacionados.

Leone (1995), presenta una lista detallada de los elementos que pueden verse afectados por deslizamientos: personas y todas las actividades relacionadas con ellas (actividades económicas, trabajos, equipamientos, salud, etc.); edificios, desde los que se usan como vivienda habitual a los que se utilizan como vivienda secundaria, pasando por hospitales, colegios u otro tipo de edificios públicos, además de considerar las características constructivas del edificio (si es de hormigón, de hierro, de madera, etc.), factores que influirán en cómo ese edificio se comporta cuando es afectado por un deslizamiento; infraestructuras, las carreteras u otras líneas de comunicaciones y líneas de servicios (luz, agua, gas, telecomunicaciones, etc.); los terrenos o propiedades, que en zonas donde la agricultura está muy arraigada y es el principal medio de sustento tiene, además, un valor sociológico; y un elemento significativo que se ve gravemente afectado es el propio ambiente (Coburn et al., 1991). Dichos elementos pueden incorporarse a la expresión del riesgo ($R=H \times E \times V$) teniendo en cuenta su valor económico (Bonachea et al., 2004). Sin embargo, en el caso de las personas y de las actividades económicas es más complicado estimar su valor (el valor de una persona, si es que existe, dependerá de diversos factores como edad, productividad, etc.), así como la representación gráfica de las mismas, ya que no se tratan de elementos estáticos. Además, cabe señalar que, en ocasiones, la repercusión de las pérdidas económicas se puede producir lejos de la zona de ocurrencia del proceso. De ahí que la mayoría de los trabajos realizados consideren sólo los elementos materiales.

3.3 Vulnerabilidad

UNDRO (1991), define la vulnerabilidad (*vulnerability*) como *"the degree of loss to a given element at risk or set of such elements resulting from the occurrence of a natural phenomenon of a given magnitude and expressed on a scale from 0 (no damage) to 1 (total loss)"*.

Uno de los principales objetivos de la *International Decade for Natural Disaster Reduction* (IDNDR) iniciada en los años 90, era reducir la vulnerabilidad a los desastres naturales. El principal problema que se planteaba era que no todos los organismos dedicados a la reducción de desastres interpretan por igual el concepto de vulnerabilidad.

El análisis de la vulnerabilidad debida a procesos a naturales se ha limitado a los elementos físicos y económicos, mientras que los factores sociales han sido, en la mayoría de los casos, olvidados. Para estimar la vulnerabilidad de distintos elementos ante un determinado proceso, se ha recurrido a experiencias de sucesos anteriores que han permitido realizar estimaciones del grado de daño sufrido por elementos de similares características. Hasta el momento son escasos los trabajos publicados en relación con este tema y las metodologías empleadas, en la mayoría de ellos, son de un carácter tan subjetivo que no son reproducibles o son sólo aplicables a zonas muy concretas.

Se pueden distinguir dos escuelas en el ámbito de la vulnerabilidad, aquella que la estudia desde un punto de vista físico o de análisis de daños materiales, o bien aquella que lo trata desde el ámbito social o humano, estudiando los posibles daños que pueden sufrir las personas y las actividades económicas.

Uno de los primeros autores que utiliza el término vulnerabilidad es Varnes (1984). Este autor hace una revisión de los diferentes aspectos involucrados en el riesgo debido a distintos fenómenos naturales o tecnológicos. La vulnerabilidad, para este autor, viene definida como el grado de daños potenciales, expresado de 0-1, sufridos por un elemento o grupo de elementos expuestos como consecuencia de un fenómeno natural de una intensidad dada. Esta definición ha sido prácticamente aceptada posteriormente por la mayoría de los autores que han trabajado en el campo de los deslizamientos, quienes en general se han referido al trabajo anterior (Brabb, 1984; Alexander, 1993; Fell, 1994; Leone et al., 1996; Leroi, 1996; IUGS, 1997; Dai et al., 2002; Remondo et al., 2004, 2005a).

Coburn et al. (1991), definen la vulnerabilidad como el grado de pérdida causado en un elemento determinado (o serie de elementos) resultante de una amenaza dada con un nivel de gravedad también definido. Así, la vulnerabilidad de un elemento se expresa usualmente como el porcentaje de pérdida (o como un valor entre 0 y 1) para un nivel de amenaza dado. Las pérdidas dependen del elemento en riesgo y, por consiguiente, pueden expresarse como fracción del número de muertos o heridos del total de la población, como el costo de reparación o como el grado de daño físico definido según una escala apropiada. En determinados elementos, tales como grupos de edificios, se puede definir según la proporción de edificios que experimentan algún nivel particular de daño.

Fell (1994) y la IUGS (1997), definen la vulnerabilidad como el grado de pérdidas de un elemento o grupo de elementos en el área afectada por los deslizamientos. Ésta, se expresa en una escala de 0 (sin daños) a 1 (pérdidas totales). Para pérdidas de personas, la vulnerabilidad es la probabilidad de que una vida particular se pierda cuando el deslizamiento ocurre. En propiedades, las pérdidas corresponderán al valor de la propiedad.

Mejía-Navarro et al. (1994), definen la vulnerabilidad como la predisposición intrínseca de cualquier elemento a estar en riesgo y sufrir pérdidas, tanto económicas como personales, y dentro de éstas incluso las psicológicas debidas a la ocurrencia de un evento peligroso de intensidad i .

D'Ercole (1996), presenta la vulnerabilidad como la propensión más o menos pronunciada a sufrir perjuicios cuando ocurre un fenómeno natural, antrópico o mixto, destructor. Según el mismo autor esta definición es complementaria a la propuesta por Varnes y otros autores.

Leone et al. (1996), consideran la vulnerabilidad como el nivel de daños potenciales, en un rango de 0 a 1, sufridos por un determinado elemento, el cual se ve afectado por un evento o fenómeno, real o posible, con una intensidad dada. La evaluación de la vulnerabilidad implica conocer cómo es la interacción entre el fenómeno natural y el elemento expuesto.

Leroi (1996), considera la vulnerabilidad como el grado de pérdidas, de 0% a 100% resultantes de un fenómeno potencialmente dañino. El propio autor considera que la intensidad del deslizamiento es un factor importante para estimar las funciones de daños o vulnerabilidad. Sin embargo, la estimación de estas funciones no es fácil para todos los tipos de amenaza. Si bien la evaluación de la intensidad de un terremoto es clara, no sucede lo mismo con los deslizamientos.

Manche (1997), define la vulnerabilidad como el nivel de daño potencial de una sociedad en caso de manifestarse un fenómeno. Así, esta vulnerabilidad puede descomponerse en varios tipos: vulnerabilidad humana, vulnerabilidad de edificios, vulnerabilidad de infraestructuras y vulnerabilidad secundaria o de actividades productivas.

Otros autores estudian la vulnerabilidad desde un punto de vista humano o social; Westgate & O'Keefe (1976), definieron la vulnerabilidad como el grado de riesgo ante la ocurrencia de fenómenos naturales o físicos, al cual está sometido una comunidad. El riesgo se refiere a la probabilidad de ocurrencia y al grado en el que los factores sociopolíticos y socioeconómicos afectan a la capacidad de la comunidad para absorber y recuperarse del fenómeno.

Clarke & Munasinghe (1995), entienden la vulnerabilidad como la predisposición de una sociedad a experimentar daños substanciales como resultado de peligros naturales.

Cutter (1996), presenta tres visiones de la vulnerabilidad: a) vulnerabilidad como exposición a la amenaza o riesgo, considera la ocupación humana en zonas de peligrosidad y el grado de pérdidas que se producen; b) vulnerabilidad como respuesta social, estudia la resistencia de la población a las amenazas; c) vulnerabilidad del lugar, es una mezcla de ambas.

Uitto (1998), define la vulnerabilidad como las características de una persona o grupo, que afectan a su capacidad de anticiparse, resistir y recuperarse del impacto de un peligro natural. El grado de vulnerabilidad viene definido por factores tales como estatus socioeconómico, fortuna, etnia, sexo, discapacidad y edad.

Weichselgartner & Bertens (2000), expresan la vulnerabilidad como una función de la peligrosidad, la exposición, la preparación, prevención y respuesta de un área para hacer frente a un peligro natural, y la intervención en cualquiera de estos parámetros permite modificar dicha vulnerabilidad.

Heijmans (2001), hace una serie de consideraciones sobre la vulnerabilidad:

a) La naturaleza es la causa de la vulnerabilidad de las personas, y depende de la intensidad de las amenazas y del riesgo; para la reducción de la vulnerabilidad se usan sistemas de alarma o predicción, se establecen normas, etc.

b) Las tecnologías que permiten en algunos casos mitigar y predecir los desastres son demasiado costosas, sobre todo en el caso de países subdesarrollados. La vulnerabilidad se podrá reducir si: los gobiernos adaptan las medidas de seguridad, adoptan sistemas de seguros, crean fondos para hacer frente a los desastres o proveen asistencia técnica y financiera a las personas para edificar.

c) La estructura social es un factor importante debido a que el impacto provocado por los desastres no afecta de igual forma a todas las personas; por tanto, son también circunstancias socioeconómicas y políticas las que contribuyen a un aumento de la vulnerabilidad.

Una recopilación de las diferentes definiciones de vulnerabilidad que se han propuesto se ha presentado por parte de Weichselgartner (2001).

De todo lo anterior se desprende que, prácticamente, todos los autores consideran el término de vulnerabilidad de forma muy similar.

3.4 Riesgo

Una vez definidos peligrosidad, elementos expuestos y vulnerabilidad, quedaría por definir el riesgo como concepto último implicado en el análisis que se pretende llevar a cabo en este trabajo. UNDR0 (1991) diferencia entre riesgo específico o “specific risk”: *“the expected degree of loss due to a particular natural phenomenon and as a function of both natural hazard and vulnerability”* y el riesgo o “risk” *“the expected number of lives lost, persons injured, damage to property and disruption of economic activity due to a particular natural phenomenon, and consequently the product of specific risk and elements at risk”*.

De forma más general, se puede definir el riesgo como la interacción entre la amenaza o peligrosidad y los objetos que están expuestos a la misma (personas, edificios, etc.), así como el grado de destrucción que dichos objetos pueden experimentar.

Como se puede apreciar, las definiciones que UNDR0 (1991) propone para “specific risk” y “vulnerability” (ver apartado 3.3) no son sustancialmente diferentes. En el presente trabajo, el término “riesgo específico” se utiliza para referirse a las pérdidas monetarias que experimenta un elemento expuesto como consecuencia de un proceso dado. Dicho riesgo específico es el producto del valor del elemento por su vulnerabilidad ante dicho proceso y por la peligrosidad. El riesgo total sería la suma de los riesgos específicos de los distintos elementos.

Los estudios de riesgo requieren conocer muy bien el proceso natural que interviene, su modelización, incluir los elementos expuestos y determinar su vulnerabilidad, considerar los daños indirectos, etc. Debido a la dificultad de obtener datos sobre algunos de estos factores, la cartografía de riesgos ha experimentado poco desarrollo. Los mapas de riesgo son escasos, ya que la mayor parte de los trabajos se limitan a la realización de mapas de susceptibilidad o peligrosidad, concentrándose los esfuerzos de análisis, principalmente, en las características y descripción del proceso sin considerar los daños humanos y/o materiales que pueden ocasionarse debido a la acción de un proceso natural (Corominas et al., 1998; Carrara et al., 1991; Chacón et al., 1994; Corominas et al., 1998). No obstante, este tipo de mapas son muy útiles a la hora de desarrollar medidas de planificación del territorio y de mitigación (Mejía-Navarro & García, 1996) y, resulta de especial interés desarrollar este tipo de herramientas para conseguir una reducción de los daños futuros.

3.4.1 Evaluación del riesgo originado por distintos procesos

Muchos de los autores que trabajan en este campo, analizan la vulnerabilidad y el riesgo como si fuesen lo mismo, es decir, se considera a la vulnerabilidad como un riesgo. A continuación se muestran algunos ejemplos de trabajos para distintos tipos de procesos naturales donde se observan estos aspectos.

D'Ercole (1996), realiza un estudio de vulnerabilidad de la población expuesta ante amenazas volcánicas. A partir de una serie de variables como son: la percepción del riesgo de las personas, el conocimiento de las medidas de protección y una serie de factores de orden social y socioeconómico, obtenidos a través de una serie de cuestionarios a la población, se construyeron los mapas de percepción del riesgo, de conocimiento de medidas de protección y de factores de orden social y socioeconómico. El estudio se realizó en una serie de provincias administrativas de Ecuador. Mediante un proceso de superposición de los mapas y análisis estadístico factorial, se definieron para las distintas provincias un conjunto de nueve unidades (1-9) a las cuales les correspondía un determinado tipo de vulnerabilidad de carácter cualitativo (urbana, periurbana y rural). Del estudio se desprendía una diferencia clara entre las unidades definidas:

- las unidades urbanas eran las menos vulnerables debido a que mostraban una alta percepción del riesgo y contaban con medidas de protección y con mayor información.
- las unidades rurales eran las más vulnerables debido a su baja percepción del riesgo, la falta de medidas de protección y su bajo nivel económico o social. También se observaban marcadas diferencias entre las diversas provincias.

Dicho estudio permitió el desarrollo de un mapa que representaba medidas o acciones necesarias con el fin de preparar a la población ante las amenazas de un volcán. El riesgo aquí se afronta desde un punto de vista social, de forma que se diferencian las sociedades más expuestas al riesgo. A pesar de su carácter cualitativo, este trabajo permitió desarrollar un programa de medidas de preparación y/o mitigación ante la amenaza en las zonas más vulnerables. Su principal ventaja es que puede ser reproducido fácilmente.

Ledoux (1994) y Graillet et al. (2000), proponen el desarrollo de un sistema jerárquico “multi-criterio” que contribuya tanto al procesado de tales elementos como al de los parámetros socioeconómicos asociados. Un primer paso consiste en construir un modelo de criterios y subcriterios de vulnerabilidad. Así, identifican los diferentes tipos de ocupación del suelo y asignan un valor numérico a cada parcela de terreno afectada, analizando los efectos derivados de una inundación. A partir de un conjunto de factores jerarquizados, se obtienen los criterios de vulnerabilidad; a estos criterios se les asignan unos pesos entre 0 y 1, y se ponderan siguiendo un criterio de experto. Se realizan análisis de sensibilidad para ver cómo cambian los valores en función del criterio predominante. Finalmente, se obtienen parcelas con distinto grado de vulnerabilidad.

Este método no tiene en cuenta las características del proceso, sólo considera si un rasgo, como por ejemplo los usos del suelo, puede o no experimentar daños por inundaciones. A pesar de obtenerse valores cualitativos, permite discriminar las áreas o zonas más afectadas si ocurre la inundación. De esta forma se pueden desarrollar las medidas de prevención o mitigación.

En Europa se han desarrollado diversos modelos con el fin de evaluar las pérdidas y los impactos producidos por las inundaciones (Klaus et al., 1995). El principal problema de estos modelos es que sólo tienen aplicación a escala regional. Otros trabajos se basan en describir la vulnerabilidad como la susceptibilidad o sensibilidad del uso del suelo a las inundaciones (Gendreau et al., 2000), expresando ésta en términos económicos. Para el cálculo de la vulnerabilidad se usa, por tanto, el valor del uso del suelo pero teniendo en cuenta el máximo riesgo aceptable, el cual se evalúa económicamente.

En EEUU se desarrolló un Sistema de Información Geográfica (SIG) denominado HAZUS, el cual, a partir de una serie de módulos, permite evaluar el riesgo y estimar las pérdidas debidas a terremotos, huracanes e inundaciones u otras amenazas que son inducidas por éstos (FEMA, 1997). En un futuro, esta metodología podría extenderse a otros tipos de amenazas. En 1995, la *Federal Emergency Management Agency* desarrolló un programa a escala nacional de identificación y mitigación de pérdidas, tanto humanas como económicas, causadas por los procesos naturales (*Impact Project*), entre ellas las debidas a deslizamientos (FEMA, 1997). En este programa se intentó involucrar a diferentes organismos, administraciones, técnicos, científicos y población, en materia de identificación, prevención y mitigación de desastres. Actualmente son muchos los estados americanos que tienen su propio programa de evaluación de riesgos naturales, identificación de la peligrosidad, mapas de vulnerabilidad, mapas de riesgo y programas de prevención y mitigación. Los mapas de riesgo resultantes son en general resultado de la superposición de mapas de peligrosidad y de vulnerabilidad obtenidos mediante criterio de experto. Por tanto, dichos mapas tienen un carácter cualitativo y sirven para determinar las zonas en las que se pueden producir mayores daños, pero sin hacer estimaciones cuantitativas ni contrastadas.

En Australia, a partir de 1996 se han llevado a cabo estudios multirriesgo debidos a diferentes procesos naturales en los principales condados (*Cities Project*), cuyo principal objetivo era la reducción de los riesgos en las comunidades de población (Hayne et al., 2001; Michael-Leiba et al., 2003). En lo que se refiere a los deslizamientos, el estudio se realiza tomando como unidades de análisis las unidades geológicas y el área de deslizamientos cartografiados; por tanto, si en una unidad no existen deslizamientos, el riesgo se considera nulo. La peligrosidad o amenaza se estima a partir de frecuencias de deslizamientos o de precipitaciones. La vulnerabilidad, que dependerá de la naturaleza de los elementos en riesgo, de su posición, velocidad, magnitud y volumen del deslizamiento, etc., se obtiene para tres tipos de elementos expuestos: personas, edificios y carreteras. Se consideran el número de personas, edificios y kilómetros de carreteras existentes, así como las pérdidas esperadas para cada elemento en 100 años. Por ejemplo, en el caso de que un edificio sea totalmente destruido su vulnerabilidad es $V = 1$, si es la mitad del edificio entonces será $V = 0,5$. Los valores de vulnerabilidad estimados oscilan entre 0,9 y 0,05, para personas; 1,0 y 0,25 para edificios; 1,0 y 0,3 para carreteras. A partir de estos datos se obtienen los mapas de riesgo específico y total.

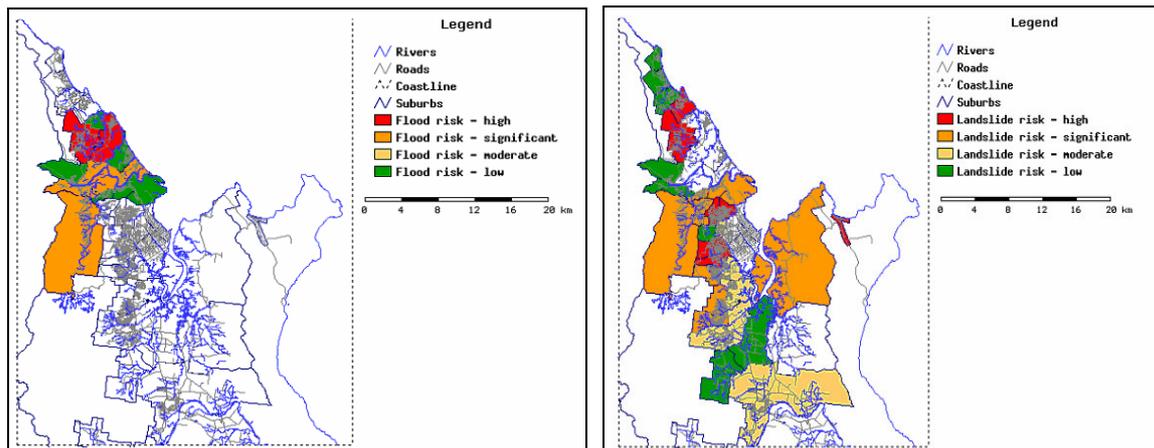


Figura 3.3. Ejemplos de mapas de riesgo por inundaciones y deslizamientos en el condado de Cairns (Australia), (fuente: <http://www.ga.gov.au/map/cairns/TOC.html>).

Las principales limitaciones del método utilizado son: la regionalización de los análisis; el no considerar la magnitud de los deslizamientos a la hora de estimar la peligrosidad y la vulnerabilidad; los valores de vulnerabilidad se asignan teniendo en cuenta estudios anteriores por lo que pueden no ser válidos para determinadas zonas. A pesar de obtenerse una evaluación del riesgo de carácter cuantitativo, los mapas de riesgo muestran expresiones cualitativas (Figura 3.3). El método permite comparar el riesgo ocasionado por diferentes procesos naturales.

Uitto (1998), propone un estudio de vulnerabilidad por terremotos en la ciudad de Tokio. Este autor recopila gran cantidad de datos sobre daños producidos por el terremoto de 1923 con magnitud = 7,9, que son almacenados y gestionados a través de un SIG. Este autor define dos índices de vulnerabilidad cuyos rangos oscilan entre 0 y 5, cuya conjunción da lugar a vulnerabilidades entre 1 y 10. Uno de los índices que se obtiene a partir de las personas afectadas directamente por distintas intensidades del terremoto y por la población afectada en el momento de la evacuación; los criterios utilizados son: población nocturna, población diurna, población en periodos intermedios, etc. Otro se aplica para edificios que podrían colapsar o incendiarse como consecuencia del terremoto; los distintos criterios utilizados son: estructura, uso, número de edificios, pendientes, etc. A partir de este análisis se zonifican las áreas más vulnerables o de mayor riesgo. Este autor, proveniente de la geografía humana, trata el problema desde un punto de vista social, por lo que dedica especial atención a los análisis de vulnerabilidad de las poblaciones más frágiles.

Yong et al. (2001), desarrollan un método para estimar las pérdidas debidas a terremotos. El método se puede aplicar de dos formas diferentes: 1) la definición de un factor de daños o de pérdidas que viene definido por la relación existente entre pérdidas en unidades monetarias y el valor de reposición de cada elemento. Su principal inconveniente es la escasez de datos para muchas zonas, por eso se recurre a estimar la, 2) vulnerabilidad macroeconómica, que se basa en que el PIB está directamente relacionado con la exposición. Las pérdidas, por tanto, dependen directamente de la peligrosidad, de la intensidad del terremoto y del valor del PIB. Generalmente, después de un terremoto la actividad económica de la zona afectada disminuye, y por tanto los ingresos de la población. El método se puede aplicar fácilmente a zonas en las que existan datos a nivel municipal. Sin embargo, en el caso de los deslizamientos, la disminución del PIB en la zona no es un criterio adecuado, ya que el tipo de daños son distintos y, en general, de

menor cuantía. Este método es útil a la hora de señalar a gran escala cuales son las zonas que se ven más afectadas por un proceso de este tipo.

También se han realizado aproximaciones al estudio de la vulnerabilidad frente a aludes de nieve (Keylock & Barbolini, 2001). Los modelos propuestos por diferentes autores se basan en el desarrollo de modelos de frecuencia y modelos dinámicos que simulan el comportamiento y progresión de la nieve. Los valores de vulnerabilidad varían a medida que la avalancha, de determinado tamaño y frecuencia, se mueve ladera abajo. En la vulnerabilidad también influye la presión con la que impacta la nieve. Teniendo en cuenta los daños producidos por similares avalanchas se calculan las vulnerabilidades medias de los tipos de avalanchas estudiados, pero siempre asignando un valor mediante criterio de experto.

De todo lo anterior se desprende que la mayoría de las cartografías de riesgo no son en sí mapas de riesgo s.s. sino que se refieren más bien a la amenaza o vulnerabilidad.

3.4.2 Evaluación del riesgo por deslizamientos

Los trabajos sobre vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos han sido relativamente numerosos en las últimas dos décadas, si bien, en muchos casos han sido de carácter teórico, dedicándose a discutir la definición del concepto de vulnerabilidad, el tipo de vulnerabilidades existentes, tipos de elementos afectados, etc.

Brabb (1984), concibe el riesgo por deslizamientos como el número de muertes, personas heridas, daños a la propiedad e interrupciones en la actividad económica. En este sentido, un mapa de riesgo por deslizamientos debiera mostrar el área y/o población expuesta al peligro, la vulnerabilidad a los deslizamientos del área y de la población, y las consecuencias para personas y estructuras en el caso de que se produzca un deslizamiento. Sin embargo, y a pesar de que han pasado ya dos décadas, este tipo de mapas, con los detalles que conllevan, no se han realizado.

Bernknopf et al. (1988), proponen un método para discriminar las zonas en las cuales es más beneficioso, desde un punto de vista económico, llevar a cabo medidas de mitigación para evitar las pérdidas por deslizamientos. Estos autores dividen la zona de estudio en unidades de 100 m², y como factores condicionantes de los deslizamientos consideran la geología y la pendiente. En esas celdas se calcula la probabilidad de deslizamiento y el valor de los elementos en ellas presentes (si en una celda ocurre, al menos, un deslizamiento la probabilidad de deslizamiento será igual a 1, o máxima y las pérdidas se corresponden con el valor de los elementos); por tanto, en estas zonas el riesgo es máximo. Una vez obtenidos ambos valores, elaboran un mapa donde se discriminan áreas que no necesitan medidas de mitigación, áreas que necesitarían algunas medidas de mitigación que podrían reducir las pérdidas esperables y áreas que necesitarían medidas de mitigación en toda la unidad de 100 m². Así, llevan a cabo un estudio coste-beneficio de la rentabilidad de las medidas de mitigación aplicadas, y concluyen que si se llevasen a cabo medidas de mitigación en toda la zona de estudio, el coste de las mismas sería superior al de las pérdidas esperables; a modo de ejemplo, si se actuase sólo en las celdas con pendientes superiores a 14° o con resistencia al corte menor de 0,49, el beneficio sería máximo (1,7 millones de dólares). Este trabajo es uno de los primeros que representa el riesgo o el número de pérdidas en un mapa, y además lleva a cabo un estudio coste-beneficio de las medidas de mitigación a desarrollar. Las objeciones que se pueden hacer al método son: la

generalización que en cada celda se hace de la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad y del riesgo por deslizamientos; la no consideración de la magnitud del deslizamiento, ni el tipo de elemento afectado; el valor de riesgo que se obtiene es muy elevado, al considerar los valores máximos en determinadas celdas. De manera especial, los valores obtenidos no se contrastan a través de validación con datos independientes.

Einstein (1988), define el riesgo como el resultado de multiplicar la peligrosidad por el valor de las pérdidas potenciales en vidas, en actividades económicas y en el ambiente. Por ello, tanto la peligrosidad como las pérdidas deben expresarse de forma cuantitativa. Según el autor, el método más sencillo de estimar el riesgo es multiplicar los costes de reparación por la probabilidad de que se produzcan deslizamientos. Sin embargo, estos costes son difíciles de estimar en el caso de daños ambientales y de las propias personas (aunque en algunos casos se ha calculado entre 0,5 y 5 millones de dólares). Para facilitar los diferentes análisis, se plantea estimar el riesgo de forma separada para cada elemento en riesgo, y realizar un mapa de riesgos mediante la superposición del mapa de peligrosidad con el mapa de usos del suelo, o bien con el mapa del valor de las propiedades. Además, propone una serie de medidas a llevar a cabo para hacer frente al riesgo por deslizamientos entre las que están: medidas pasivas, medidas activas, sistemas de alarma u obtención de información de mayor detalle.

Este autor establece las bases o los factores a considerar en la elaboración de mapas de riesgo, sin embargo no lo aplica a ningún caso concreto, con lo cual no se pueden conocer los resultados obtenidos con este método. A pesar de ello, el método parece muy razonable y apunta hacia la obtención de un mapa expresado en términos cuantitativos o económicos.

Moon et al. (1992), presentan un mapa de riesgo para un *debris flow* que afecta a distintos elementos. A partir del cálculo de la probabilidad de deslizamiento, de la situación del elemento y de la vulnerabilidad de personas (con valores entre 0,01 y 0,8) y edificios (con valores entre 0,1 y 1), se estima el riesgo específico, tanto para personas como para elementos materiales de forma cuantitativa y cualitativa. El mapa obtenido está representado por números y letras que se corresponden con unas determinadas clases de riesgo que varían a lo largo de su posición con respecto al deslizamiento (Figura 3.4).

Los valores de vulnerabilidad se asignan de forma cualitativa y los de peligrosidad en función del tamaño y tipo del deslizamiento definidos por Varnes (1978), por lo que el mapa muestra un alto grado de subjetividad; sin embargo, es uno de los primeros mapas de riesgo que se ha obtenido para deslizamientos.

Morgan et al. (1992), definen la vulnerabilidad como el producto de tres factores: una vulnerabilidad espacial, que representa la probabilidad de que el elemento sea afectado; una vulnerabilidad temporal, que muestra la probabilidad de que un evento afecte a un elemento en un periodo determinado; y una vulnerabilidad que representa las pérdidas humanas o bien el valor de los elementos afectados. Este producto equivaldría al riesgo, ya que los dos primeros factores se asimilarían con la peligrosidad, y el último con las pérdidas o consecuencias debidas al deslizamiento.

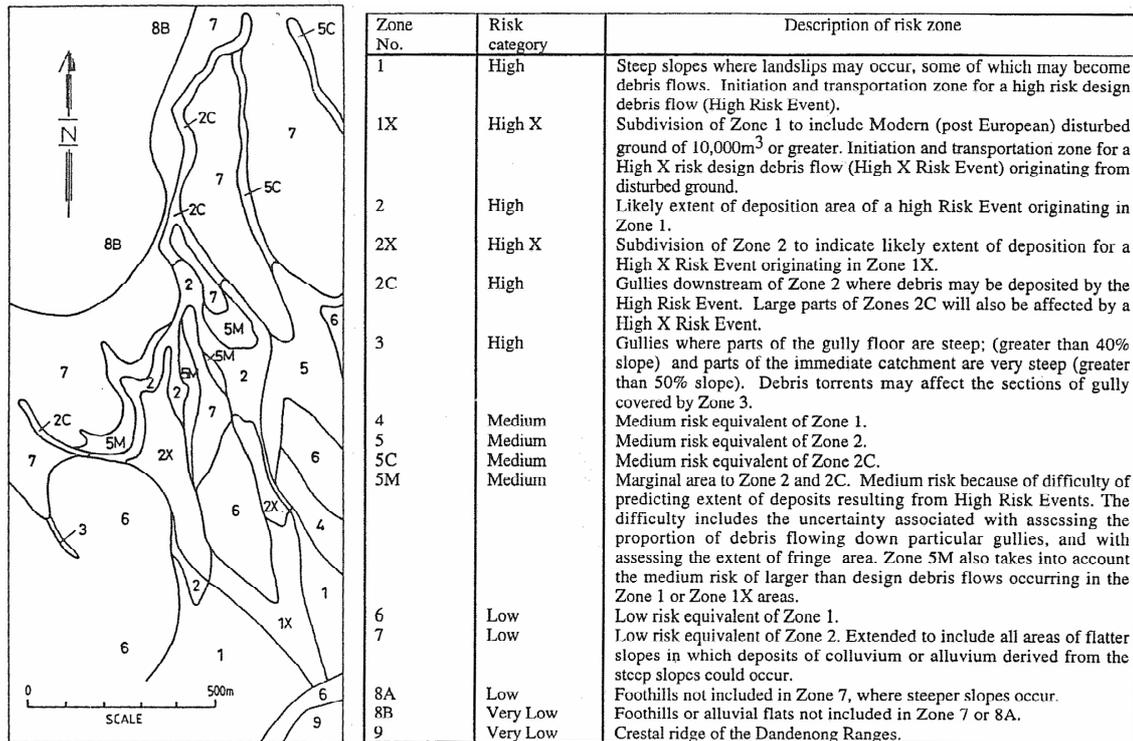


Figura 3.4. Ejemplo de mapa de riesgo para *debris flows* propuesto por Moon et al. (1992) y modificado por Fell & Hartford (1997).

Fell (1994), considera que la vulnerabilidad es función de tres parámetros:

- probabilidad espacial de impacto: es decir de que un elemento se vea afectado por un determinado deslizamiento, dado que ese deslizamiento tiene lugar en una determinada zona.
- probabilidad temporal de impacto: que el elemento expuesto sea afectado en el momento del impacto (esto se aplica a elementos no fijos, como personas o vehículos).
- probabilidad de pérdidas: que una persona sea afectada como consecuencia de que un deslizamiento ha destruido, por ejemplo, un edificio. O bien, la proporción del valor del elemento impactado que se ha perdido.

Según el mismo autor, es más fácil calcular la vulnerabilidad descomponiéndola en estas tres variables. Esta acepción es similar a la presentada por Morgan et al. (1992). Fell (1994) asigna valores de vulnerabilidad por pérdidas en propiedades a las clases de deslizamientos propuestas por Varnes (1978) en función de su magnitud (Tabla 3.1). Otro factor a tener en cuenta es que la vulnerabilidad de las propiedades es diferente a la vulnerabilidad de las personas. Esto significa que un edificio puede tener una alta o baja vulnerabilidad ante un deslizamiento; sin embargo, esta vulnerabilidad será distinta si en el edificio habita gente o no, si la gente es anciana, si duerme cuando ocurre el deslizamiento, etc. El mismo autor muestra una serie de ejemplos en los que estima la vulnerabilidad, tanto para personas como para propiedades. De este modo, una casa situada en la zona de ruptura del deslizamiento tendrá una vulnerabilidad de 1,0, mientras que la vulnerabilidad de las personas será de 0,05; si la casa se sitúa por debajo de la zona de ruptura su vulnerabilidad es de 0,45 y la de las personas 0,15; si la casa se sitúa en la base de la masa deslizada, su vulnerabilidad es de 0,025 y la vulnerabilidad personal es de 0,005; pero, en

determinados casos, los mayores daños provocados por los deslizamientos se producen en la zona de depósito o próximos a ésta.

El principal inconveniente de esta manera de abordar el problema es la subjetividad a la hora de relacionar los índices de vulnerabilidad con las distintas magnitudes de deslizamiento. Tampoco se tiene en cuenta el tipo de movimiento ya que, dependiendo de éste, la magnitud o intensidad y alcance serán diferentes. La asignación de valores de vulnerabilidad no deja de ser más que un criterio subjetivo (los datos sobre pérdidas ocurridas en el pasado no se consideran) y su aplicación a otras zonas puede presentar complicaciones.

Tabla 3.1. Valores de vulnerabilidad (Fell, 1994) propuestos para las clases de deslizamiento definidas por Varnes (1978), de acuerdo con su magnitud.

Magnitud (M)	Descripción	Vulnerabilidad (V)	Calificación
7	Extremadamente grande	>0,9	Muy alta
6	Muy grande	0,5-0,9	Alta
5	Medio-Grande	0,1-0,5	Media
4	Medio	0,05-0,1	Baja
3	Pequeño	<0,05	Muy baja

Fell (1994) y Fell & Hartford (1997) discuten sobre los diferentes factores a considerar en el riesgo y diferencian entre el riesgo específico (peligrosidad por vulnerabilidad de un determinado elemento) y el riesgo total (número esperable de muertes, personas heridas, daños a propiedades, etc.), coincidiendo con la idea de Varnes (1984) y UNDRO (1991). También discuten sobre el nivel de riesgo aceptable (riesgo con el cual la sociedad está preparada para convivir: en el caso de personas podría aplicarse un valor de 10^{-3} , mientras que en propiedades se podría aceptar un riesgo, en términos de probabilidad, de 10^{-2}).

Mejía-Navarro et al. (1994) y Mejía-Navarro & García (1996), desarrollan un algoritmo para evaluar la vulnerabilidad, que descomponen en un conjunto de componentes culturales y físicos, líneas de transporte y usos del suelo, donde:

$$\text{Vulnerabilidad} = \frac{(\text{densidad humana} \times A + \text{uso del suelo} \times B + \text{líneas de transporte} \times C)}{(A + B + C)}$$

Los parámetros A, B y C, son valores de pesos asignados a los diferentes elementos vulnerables, que pueden ser modificados en función de los criterios adoptados por expertos. Así, por ejemplo, asignan pesos altos a las áreas de alta densidad de población, a zonas próximas a líneas de comunicación o de transporte, o bien a zonas con construcciones de gran entidad. En el caso de las autopistas se incluye un corredor de 40 metros con el fin de protegerlas, ya que su mantenimiento es muy caro. Modificando estos pesos se pueden simular una serie de escenarios de vulnerabilidad o riesgo. El uso de los SIG y de los Sistemas de Toma de Decisiones, permite realizar dichas simulaciones en cortos espacios de tiempo.

Este método presenta un alto grado de subjetividad. En la asignación de pesos no se tienen en cuenta las características del propio deslizamiento, tampoco se explica cómo incorporar los resultados obtenidos a los mapas de riesgo, ni cómo se incorporan los distintos elementos considerados al análisis, ya que el valor de vulnerabilidad obtenido es un valor general para todo el conjunto de elementos considerados.

Entre los trabajos que más ahondan en el estudio de la vulnerabilidad debida a deslizamientos cabe citar a Leone (1995) y Leone et al. (1996). Estos autores limitan los elementos que pueden sufrir daños a las propiedades, las personas y las distintas actividades que se desarrollan en la zona. La vulnerabilidad de cada uno de estos elementos es diferente y depende de distintos factores (físicos, sociológicos, técnicos, características del deslizamiento, etc.). Además, consideran fundamental analizar los efectos producidos por los deslizamientos en el pasado para realizar un estudio de la vulnerabilidad. Estos autores crean las matrices de daños, las cuales representan en abcisas los elementos expuestos y sus características, mientras que las características del deslizamiento, junto con los factores que influyen en la vulnerabilidad, se sitúan en ordenadas. En función de todos estos parámetros y del valor económico de mercado, del valor económico práctico, del valor funcional y del valor humano, se le asigna un valor de vulnerabilidad a cada tipo de elemento (Figura 3.5). Los mismos autores proponen una lista de elementos vulnerables afectados con diferentes grados de intensidad de daños (mínimo I - máximo V), a los cuales asignan diferentes valores de vulnerabilidad. En el caso de las personas, para una intensidad de daños 1, la vulnerabilidad es 0,001; por el contrario, para una intensidad de daños 5 (equivalente a fallecimiento de las personas) este valor de vulnerabilidad es 1. Finalmente, aplican el método a un área de Francia donde estiman el grado de pérdidas por deslizamientos de 0 a 1, considerando distintos escenarios. Asimismo, apuntan que el método debiera aplicarse a otras zonas para su validación y mejora.

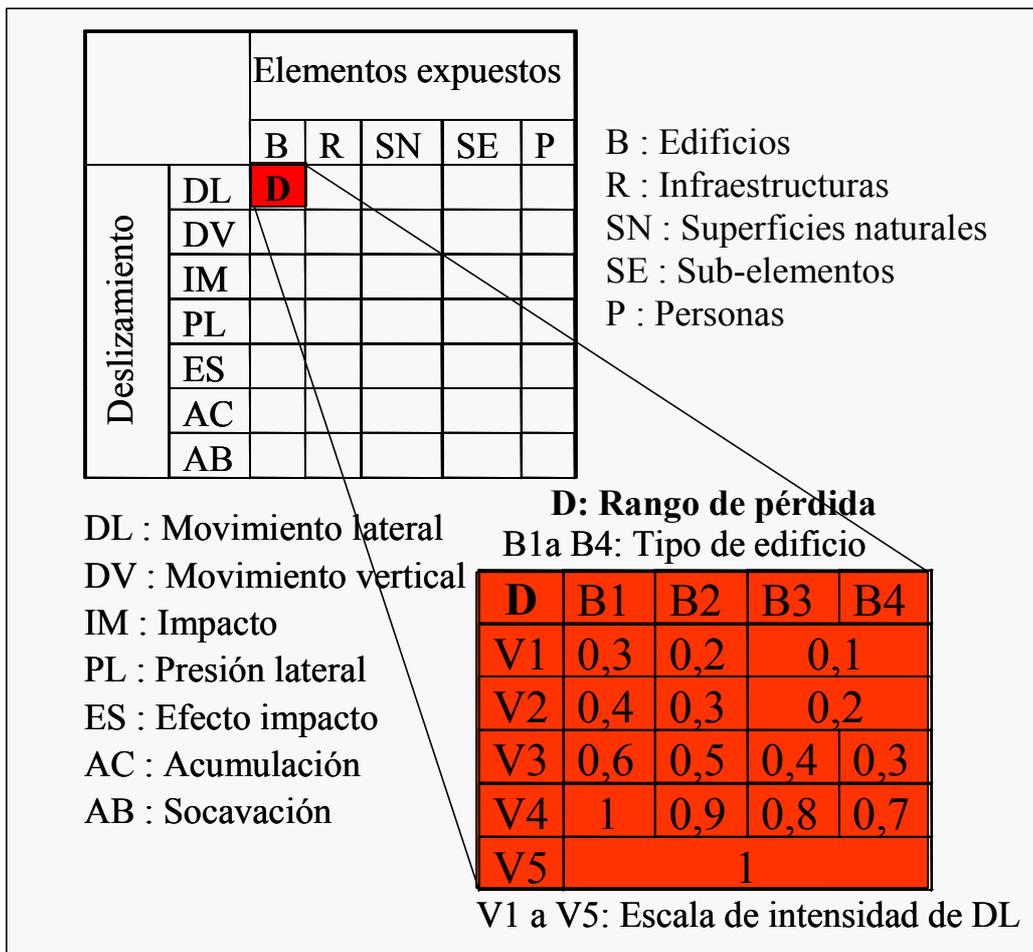


Figura 3.5. Ejemplo de matriz estructural de daños (Leone et al., 1996).

La obtención de la vulnerabilidad no es evidente, a pesar de que se tienen en cuenta muchos de los factores que intervienen en el deslizamiento, las características de los elementos y el estudio de los daños producidos en el pasado; el criterio de experto juega un papel fundamental en la asignación de estos valores. Los valores de vulnerabilidad asignados a los diferentes elementos vulnerables parecen bastante razonables y se podrían incorporar a los análisis de riesgo. Sin embargo, requiere la recopilación de gran cantidad de información que en muchas zonas no existe, o bien, es difícil de obtener.

Leroi (1996; 1997) define el riesgo como el resultado de multiplicar la peligrosidad por la vulnerabilidad de cada elemento y por su valor o costo. Al igual que otros autores, considera el riesgo como el conjunto de pérdidas esperadas en vidas humanas, heridos, daños a propiedades y actividades económicas. Tampoco este autor muestra un ejemplo en el que se aplique este método, por lo que no deja de ser un método teórico cuyo uso no está contrastado al no darse ejemplos claros en los que aplicarlo.

Einstein (1997) hace una revisión de una serie de métodos a utilizar para estimar las pérdidas relacionadas con la actividad económica que desarrollan las personas afectadas por deslizamientos. Estos métodos se basan en la reducción de rentas como consecuencia de un evento peligroso. Así, por ejemplo, la expresión de los daños por persona y año se puede expresar como:

[Pérdidas (valor monetario) x Población]/PIB anual
o bien

Coste de pérdidas humanas = [1/2 esperanza de vida x N° de vidas perdidas x PIB]/población

Estos métodos permiten hacer comparaciones a gran escala entre distintas zonas afectadas por los movimientos en masa, pero no son útiles a escalas de detalle. Tampoco tienen en cuenta las características del deslizamiento que les afecta. El mismo autor argumenta que una de las formas de estimar la vulnerabilidad de las personas es a partir de los índices de población. Dichos índices son un claro reflejo del tipo de población existente en la zona afectada por el proceso. Por ejemplo, en Canadá, la probabilidad anual de que una persona muera por causa de un deslizamiento es del orden de 10^{-7} (Evans, 1997).

Manche (1997), considera que las matrices de daños propuestas por Leone et al. (1996) son apropiadas para el cálculo de la vulnerabilidad de las personas y de los bienes físicos. Este autor hace referencia a lo que pueden ser los daños más importantes producidos por deslizamientos, las pérdidas indirectas. Para estimar los daños indirectos, que él reduce a pérdidas por cortes en carreteras, propone realizar mapas de accesibilidad. Pero no todas las pérdidas indirectas se deben a cortes en carreteras, sino que hay otros ámbitos donde se producen pérdidas económicas (pérdidas de mercado, efectos sociológicos, etc.) como consecuencia de la aparición de un proceso natural. Por otro lado, la estimación de la vulnerabilidad se realiza mediante criterio de experto y su representación cartográfica es subjetiva (muy fuerte, fuerte, media, baja, muy baja). Este autor crea un mapa final de riesgo donde superpone un mapa de peligrosidad, determinado en función del periodo de retorno de los deslizamientos en una zona, con el mapa de vulnerabilidad. Este mapa de riesgo tiene un carácter cualitativo.

Finlay & Fell (1997), realizan estimaciones de vulnerabilidad para distintos supuestos en los que las personas que viajan por carreteras en vehículos o que se encuentran en el interior de edificios pueden ser afectadas por deslizamientos.

Wong et al. (1997), proponen una fórmula para estimar el número de muertes cuando un deslizamiento afecta a carreteras. Los parámetros que consideran son el producto de *la anchura ocupada por el deslizamiento, el número de personas que pasan diariamente, probabilidad de muerte por deslizamiento, número de carriles afectados* y un *factor de ajuste*, todo ello dividido por *la velocidad media de los vehículos*. Los mismos autores hacen una revisión de una serie de procedimientos que se pueden adoptar para cuantificar los daños debidos a deslizamientos:

- Datos históricos; permiten hacer estimaciones de elementos afectados anteriormente. En algunos casos, los datos de vulnerabilidad se han extrapolado (Finlay & Fell, 1997) y se han utilizado como valores de vulnerabilidad aproximados, pero siempre teniendo en cuenta que han sido recogidos para un determinado evento y en unas determinadas circunstancias.

- Opiniones de expertos; a pesar de ser criterios subjetivos se basan en teorías y experiencias que permiten asignar valores o criterios (Leone et al., 1996).

- Métodos analíticos; mediante el uso de modelos que simulan trayectorias o que predicen la velocidad, se pueden construir escenarios y así llegar a una estimación de daños. Así Bunce et al. (1997), estiman las consecuencias provocadas por caída de rocas sobre los conductores en una autopista.

Shaban et al. (2001), desarrollan un método para estimar el riesgo por deslizamientos en distintos tramos de una autopista en el Líbano. En función de distintos parámetros, que por orden de importancia son geología, pendiente, redes de drenaje, tipo de suelo y vegetación, a los cuales se les asignan una serie de pesos, se obtiene un valor numérico que posteriormente es transformado en una clase de riesgo.

Aunque el método es muy subjetivo, puede ser muy útil a la hora de desarrollar medidas de prevención en diferentes tramos de las carreteras consideradas. Este no sería un mapa de riesgo sino un mapa de peligrosidad.

Cardinali et al. (2002), para estimar la vulnerabilidad en la región de Umbría (Italia) utilizan una aproximación que se fundamenta en la relación entre intensidad y tipo de deslizamiento, así como los probables daños que causarían en edificios, carreteras y población los diferentes tipos de deslizamientos. Esta última estimación está basada en la información obtenida de eventos anteriores. La clasificación que obtienen en el caso de daños a estructuras e infraestructuras se divide en: *daño superficial*, los daños pueden ser reparados rápidamente y a bajo costo; *daño funcional o medio*, los diferentes elementos se ven afectados durante largo tiempo y los costos son importantes; *daños estructurales o severos*, los edificios e infraestructuras son completamente dañados, y por tanto los costos son muy grandes, ya que pueden ser necesarias labores de reconstrucción y demolición. Los daños a la población los dividen en: *daños directos*, cuando hay pérdidas de vidas humanas; *daños indirectos*, sólo se producen daños económicos; *daños temporales o permanentes de edificios* lo que conlleva evacuaciones y personas sin hogar.

El método propuesto tiene en cuenta las características del proceso y considera los daños producidos en el pasado. Es un método adecuado para estimar la vulnerabilidad de grandes áreas así como para realizar una primera aproximación a los estudios de vulnerabilidad. Sin embargo, se trata de un método cualitativo que no tiene en cuenta las pérdidas en los usos del suelo ni las pérdidas indirectas.

Flax et al. (2002) y Odeh (2002), presentan la metodología (*Community Vulnerability Assessment Tool, CVAT*) desarrollada por NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para diferentes condados de EEUU. Además de la identificación de amenazas y de un análisis de éstas, se propone una aproximación al análisis de la vulnerabilidad de instalaciones críticas (centros de emergencia, estaciones, aeropuertos, etc.), de la sociedad (densidad de población, familias pobres, personas sin vehículos, edades, etc.), de las actividades económicas (valor de construcción, propiedades domésticas, industrias, hoteles, bancos, etc.) y del ambiente (peligros secundarios, especies en peligro, paisajes, etc.). A cada uno de los elementos expuestos se le asigna un valor de exposición (0: no exposición, a 5: máxima exposición) en función del proceso que les afecta, del grado de importancia y según criterios de un gran número de expertos. El área de estudio se divide en una serie de subregiones de diferente valor de vulnerabilidad para cada uno de los elementos. La superposición con el mapa de peligrosidad permite a los planificadores determinar las zonas que pueden sufrir más riesgo, y por tanto, donde llevar a cabo medidas de mitigación.

La principal ventaja de este método es que se puede aplicar en cualquier región, siempre y cuando existan los datos necesarios, así como utilizarse en estudios multirriesgo. En cuanto a sus limitaciones, cabe destacar que se utilizan unidades basadas en el grado de exposición o vulnerabilidad sin considerar las características del proceso. Es un método cualitativo, ya que no estima las pérdidas de los diferentes elementos, sino solamente los lugares en los que estas pérdidas pueden ocurrir. Por tanto, se trata de un método que necesita mayor detalle de elaboración, pero como documento consultivo es muy interesante.

Glade (2002), en un área al este de Alemania, clasifica los elementos vulnerables frente a deslizamientos en casas, infraestructuras lineales y objetos (hospitales, colegios, estadios, etc.). Les asigna un valor de daño potencial medio basándose en datos estadísticos oficiales y en daños producidos por inundaciones. En dicho trabajo se supone que cualquier elemento en riesgo afectado por un deslizamiento es totalmente destruido, y por tanto su vulnerabilidad es 1. Por tanto, el escenario propuesto es un tanto catastrofista, dado que con una pequeña parte del elemento afectada se considera totalmente destruido.

Kong (2002), hace hincapié en la probabilidad de pérdidas de vidas humanas en Hong Kong como consecuencia de los deslizamientos. Para ello considera dos tipos de elementos en riesgo: por un lado, las carreteras y autopistas, que son utilizadas por la población y, por otro, los edificios, donde se localizan las personas. Los valores de vulnerabilidad utilizados son los mismos propuestos por Finlay & Fell (1997). A partir de una serie de escenarios que consideran la probabilidad del evento, las precipitaciones, la caída de bloques y las muertes en anteriores eventos, se estima la probabilidad anual o riesgo de que se produzca la muerte de una persona en torno a 2.41×10^{-4} , valor similar al presentado por Evans (1997). Posteriormente, Archetti & Lamberti (2003), en una cuenca de Italia afectada por *debris flows*, proponen un valor de riesgo aceptable del orden de 10^{-4} , cifra que se aproxima al valor medio debido a muertes anuales por accidentes domésticos o de tráfico.

Un aspecto importante que se aborda en el trabajo de Kong (2002) es la realización de un análisis coste-beneficio de las medidas de mitigación propuestas para reducir el riesgo. En este sentido se concluye que, dado que el riesgo para las personas es muy pequeño, las medidas preventivas pueden ser muy costosas, mientras que medidas de defensa como escolleras o redes que contribuyen a frenar los deslizamientos, serían más económicas y por tanto su relación coste-beneficio positiva.

Blong (2003), propone un índice para estimar el daño a edificios afectados por diferentes procesos naturales. Dicho índice se basa en la relación entre el coste de construcción por metro cuadrado y el coste de reposición de un edificio de tamaño medio. Sin embargo este índice no se aplica a ningún estudio de riesgos en concreto.

Glade (2003a), hace una revisión de algunos trabajos que consideran la vulnerabilidad en los análisis de riesgo por deslizamiento. Este autor lleva a cabo un estudio de riesgo por deslizamientos en dos zonas, una en Alemania afectada por deslizamientos superficiales y rotacionales, y otra en Islandia. Como en la zona de Alemania no existen datos sobre daños materiales a elementos en el pasado, se supone que si un deslizamiento afecta a un elemento, la vulnerabilidad es máxima (1). En función de esos valores se crea un mapa de unidades de elementos con un grado de vulnerabilidad cualitativo (bajo, moderado, alto y muy alto); la intersección de este mapa con el de peligrosidad permite obtener un mapa de riesgo, dividido en las mismas clases cualitativas. El estudio en la zona de Islandia se presenta en Bell & Glade (2004). Estos autores asignan los valores de vulnerabilidad en función del tipo y magnitud del proceso y del tipo de elemento afectado. Posteriormente, generan los mapas de riesgo para deslizamientos tipo *rock fall* y *debris flow*. Así calculan:

a) Riesgo individual de una persona en un edificio o probabilidad anual de pérdidas de vidas (R_{ipe}):

$$R_{ipe} = (H \times P_s \times P_t \times V_p \times V_{pe} \times P_{so}) \times E_{ipe}$$

donde,

H = peligrosidad anual del evento.

P_s = probabilidad de impacto espacial (que el edificio sea afectado)

P_t = probabilidad temporal (que exista gente en el edificio)

V_p = vulnerabilidad del edificio

V_{pe} = vulnerabilidad de las personas

P_{so} = probabilidad de ocurrencia en determinadas épocas

E_{ipe} = persona individual

b) Riesgo de personas en edificios (R_{pe})

$$R_{pe} = (H \times P_s \times P_t \times V_p \times V_{pe} \times P_{so}) \times E_{pe}$$

donde,

E_{pe} = número de personas en cada edificio

c) Riesgo económico a edificios e infraestructuras (R_p) o pérdidas económicas anuales

$$R_p = (H \times P_s \times V_p \times P_{so}) \times E_p$$

donde,

E_p = valor económico del edificio o infraestructura

Los mapas de riesgo final muestran la probabilidad de pérdidas de vidas por píxel (Figura 3.6).

Los autores indican que existen incertidumbres en los valores de riesgo obtenidos debido a las incertidumbres existentes en los datos de entrada, como por ejemplo valores de vulnerabilidad obtenidos de forma subjetiva pero con un peso muy importante en el resultado de riesgo final, falta de datos, etc. Por tanto, los valores resultantes deben ser tomados con mucha cautela y considerados como valores relativos y no absolutos. De cualquier forma, estos mapas han permitido a la administración hacer una zonificación del riesgo en el área estudiada y extrapolar el método a otras zonas.

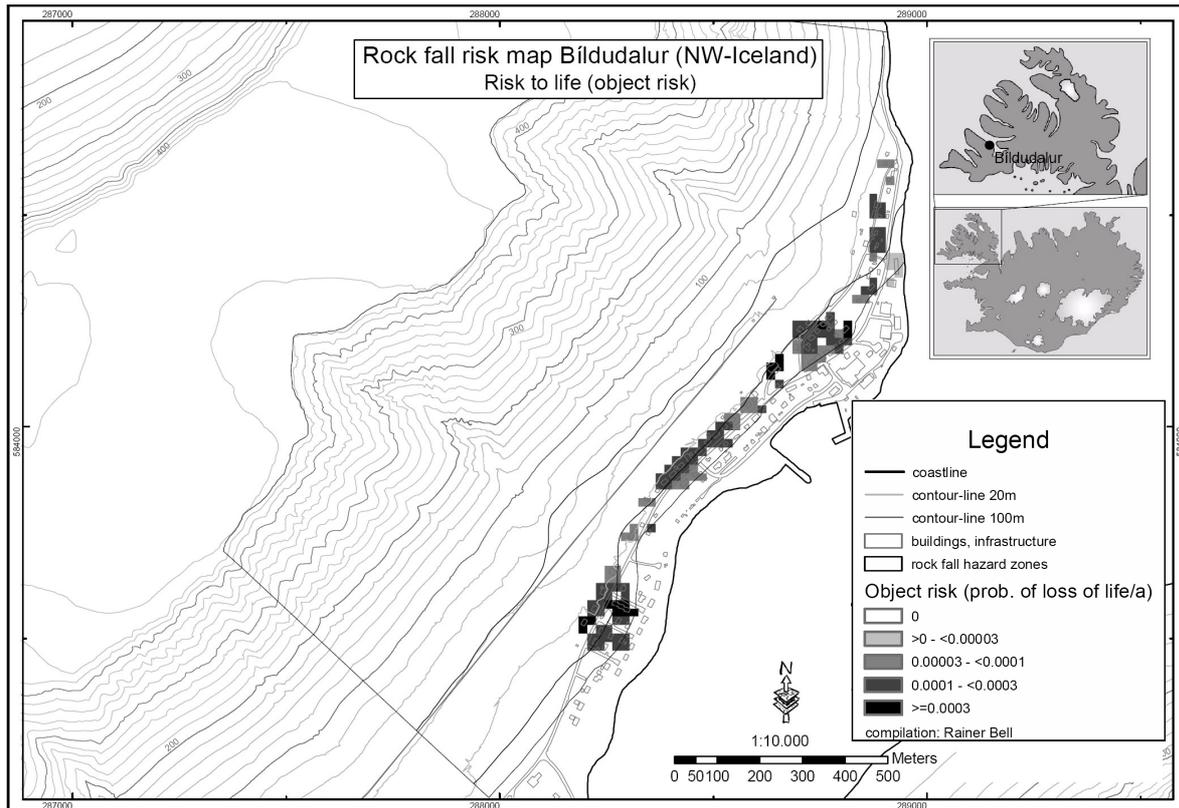


Figura 3.6. Mapa de riesgo para personas ocasionado por caídas de rocas en el NO de Islandia (Bell & Glade, 2004).

Liu et al. (2002) y Liu & Lei (2003), definen la vulnerabilidad como las pérdidas máximas potenciales debidas a un fenómeno dañino en un área específica y durante un periodo de tiempo dado, expresada de 0 a 1. Este concepto es un poco diferente al manejado hasta este momento. Para estos autores, la vulnerabilidad se divide en: física (pérdidas en infraestructuras y edificios), económica (pérdidas en la actividad económica de la zona), ambiental (pérdidas en recursos naturales) y social (población afectada). En una región de China afectada por *debris flows*, estiman una serie de índices a nivel municipal que son indicadores de cada una de estas clases de vulnerabilidad. La vulnerabilidad será, por un lado, la suma de la vulnerabilidad física (valor de los elementos), la de la vulnerabilidad económica (PIB anual) y de la vulnerabilidad ambiental (valor del terreno) y, por otro lado, el conjunto de la vulnerabilidad social (% de jóvenes y ancianos, % de analfabetos, % población rural, densidad de población). Estos valores se normalizan y se obtiene un valor de vulnerabilidad para cada municipio.

El método es útil para comparar vulnerabilidades entre municipios. Estos indicadores son válidos para todos los municipios, por lo cual el método puede ser extrapolado a otras zonas. Sin embargo, dependiendo de la zona de estudio puede que estos indicadores no sean los más adecuados y que sea necesario considerar otros datos.

Bonachea et al. (2004) y Remondo et al. (2004) y estiman la vulnerabilidad de las principales vías de comunicación como consecuencia de un determinado tipo de deslizamiento. La vulnerabilidad se define como la relación existente entre el valor de los daños medios generados en el pasado por un determinado tipo de deslizamiento y el valor del elemento. De esta forma, la vulnerabilidad queda expresada como el grado (de 0 a 1) de pérdidas monetarias potenciales esperables. Estos valores se representan en mapas de vulnerabilidad, los cuales muestran el grado de pérdidas de los elementos potencialmente afectables por un tipo de deslizamiento de características conocidas. Además, generan un modelo de riesgo por deslizamientos para carreteras (Figura 3.7), estimando unas pérdidas potenciales para los próximos 50 años (suponiendo unas condiciones similares a las existentes en el pasado) de, aproximadamente, 1 millón de Euros. A pesar de que la predicción realizada por los autores anteriormente citados debe ser tomada como una aproximación a lo que podría ser el comportamiento futuro de los deslizamientos, el mapa obtenido es uno de los primeros modelos de riesgo expresado en términos cuantitativos y económicos que se refiere en la literatura especializada. La principal ventaja de esta metodología es que los distintos mapas se obtienen a partir de criterios objetivos, universales y reproducibles. Los mismos autores proponen extenderlo a otros tipos de elementos afectados por deslizamientos, como son los edificios y usos del suelo, o las actividades económicas. Una de las finalidades de este mapa es utilizarlo como una herramienta que permita conocer dónde se van a producir los daños, si es rentable o no desarrollar medidas de mitigación en determinadas zonas y cuál es la cantidad de dinero que se puede perder en un futuro como consecuencia de los deslizamientos.

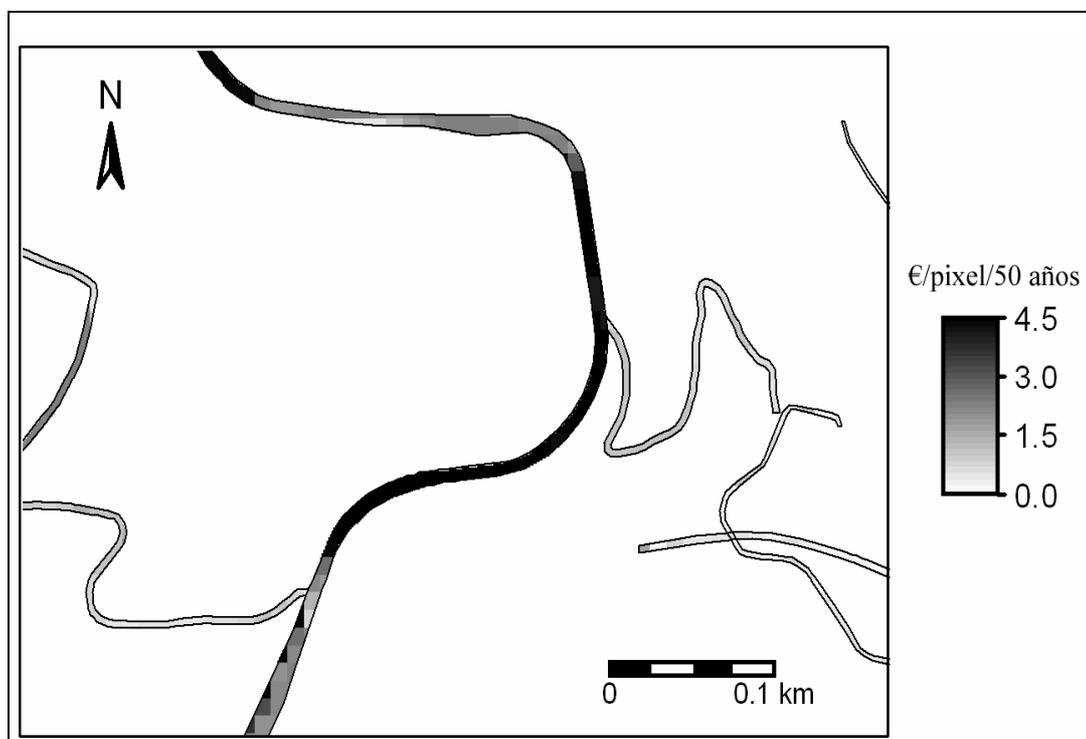


Figura 3.7. Ejemplo de mapa de riesgo por deslizamiento para infraestructuras en el municipio de Deva, Guipúzcoa (Bonachea et al., 2004).

Physical vulnerability			Social vulnerability		
Vulnerability description	Loss range	Index	Vulnerability description	Loss range	Index
Intact structures	0	0	Non affected persons		0
Local damages	1+25%	0.25	Non physical damages, evacuated persons		0.25
Seriously damages (possible to repair)	26+50%	0.5	Physical damages (person continue their activities)		0.5
Mostly destroyed (difficult to repair)	51+75%	0.75	Seriously wounded persons (50% disability)		0.75
Total destruction (out of use; e.g. >5% inclination)	76+100%	1	Died, 51-100% disability		1

Economical vulnerability		Environmental vulnerability		
Vulnerability description	Index	Vulnerability description	Loss range	Index
Non interruption	0	Intact element	0	0
Short temporary interruption (hours to day)	0.25	Local loss	1+25%	0.25
Average temporary interruption (days to week)	0.5	Seriously damages (possible to repair)	26+50%	0.5
Long temporary interruption (weeks to months)	0.75	Mostly destroyed (difficult to repair)	51+75%	0.75
Permanent interruption	1	Total destruction	76+100%	1

Figura 3.8a. Valores de vulnerabilidad asignados por Bonnard et al. (2004) a los diferentes elementos en la estimación del riesgo.

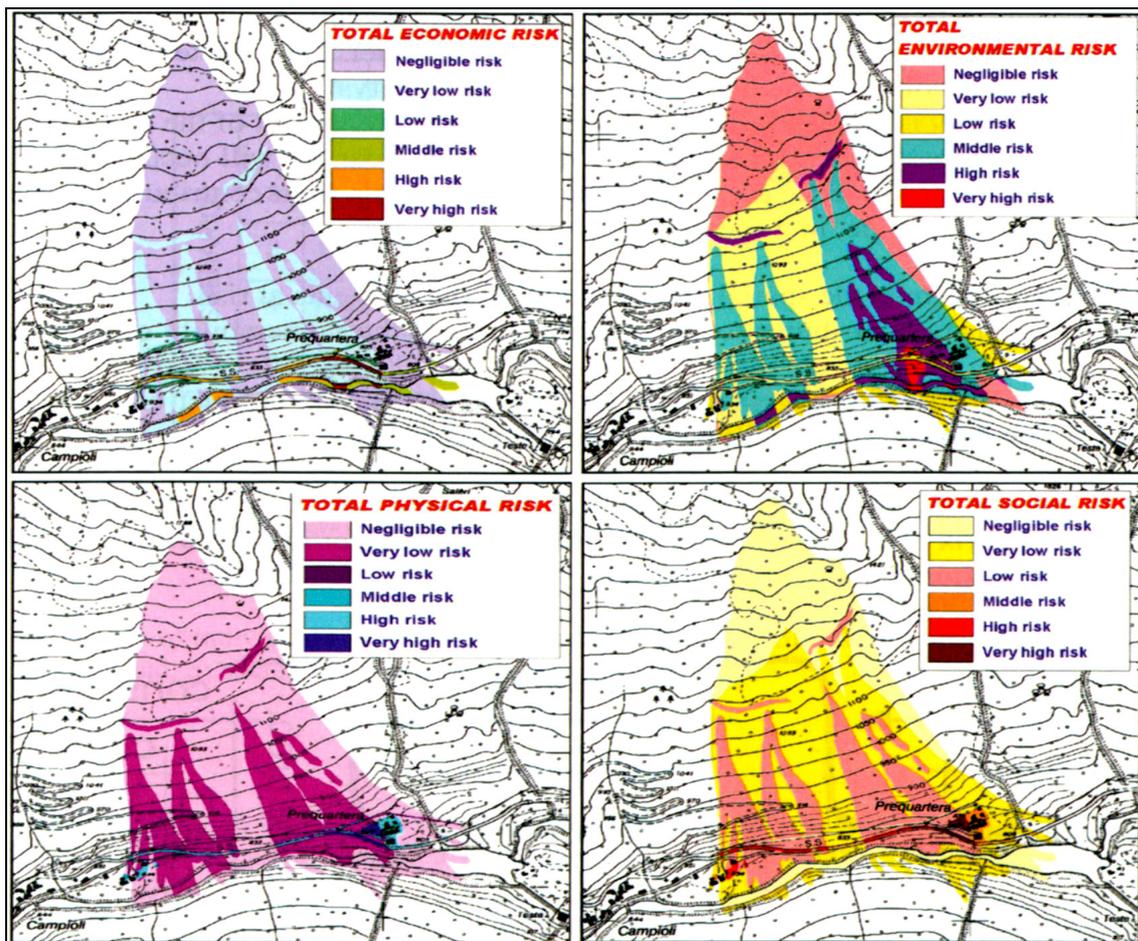


Figura 3.8b. Ejemplos de mapas de riesgo propuestos por Bonnard et al. (2004), para los distintos tipos de vulnerabilidades descritas en la figura 3.8a, en el ámbito del proyecto IMIRILAND.

Bonnard et al. (2004), analizan el riesgo provocado por grandes deslizamientos en diferentes zonas de Europa. Dentro del análisis de la vulnerabilidad, distinguen entre una vulnerabilidad física, social, económica y ambiental, a la que asignan valores de acuerdo con un criterio de experto (Figura 3.8a), por lo que esa metodología presenta un alto grado de subjetividad. Para estimar el riesgo recurren a una serie de escenarios en los cuales se tiene en cuenta el periodo de recurrencia del deslizamiento, la intensidad del proceso, el tipo de elemento afectado y su resistencia ante el proceso que le afecta. Finalmente, obtienen una serie de mapas de riesgo, de carácter cualitativo, que muestran una serie de índices con los cuales pueden reclasificar la zona en valores o clases de riesgo (Figura 3.8b).

Posteriormente, Remondo et al. (2005a) han presentado mapas que amplían el análisis del riesgo a la zona del Bajo Deva, no solamente al municipio del mismo nombre. En este trabajo se diferencia entre riesgo directo (que es la suma de los diferentes riesgos específicos en elementos como edificios, usos del suelo e infraestructuras) y riesgo indirecto, relacionado con las pérdidas económicas que pueden ocasionar indirectamente los deslizamientos. La suma de ambos constituye el riesgo total ocasionado por los deslizamientos que afectan al área (Figura 3.9).

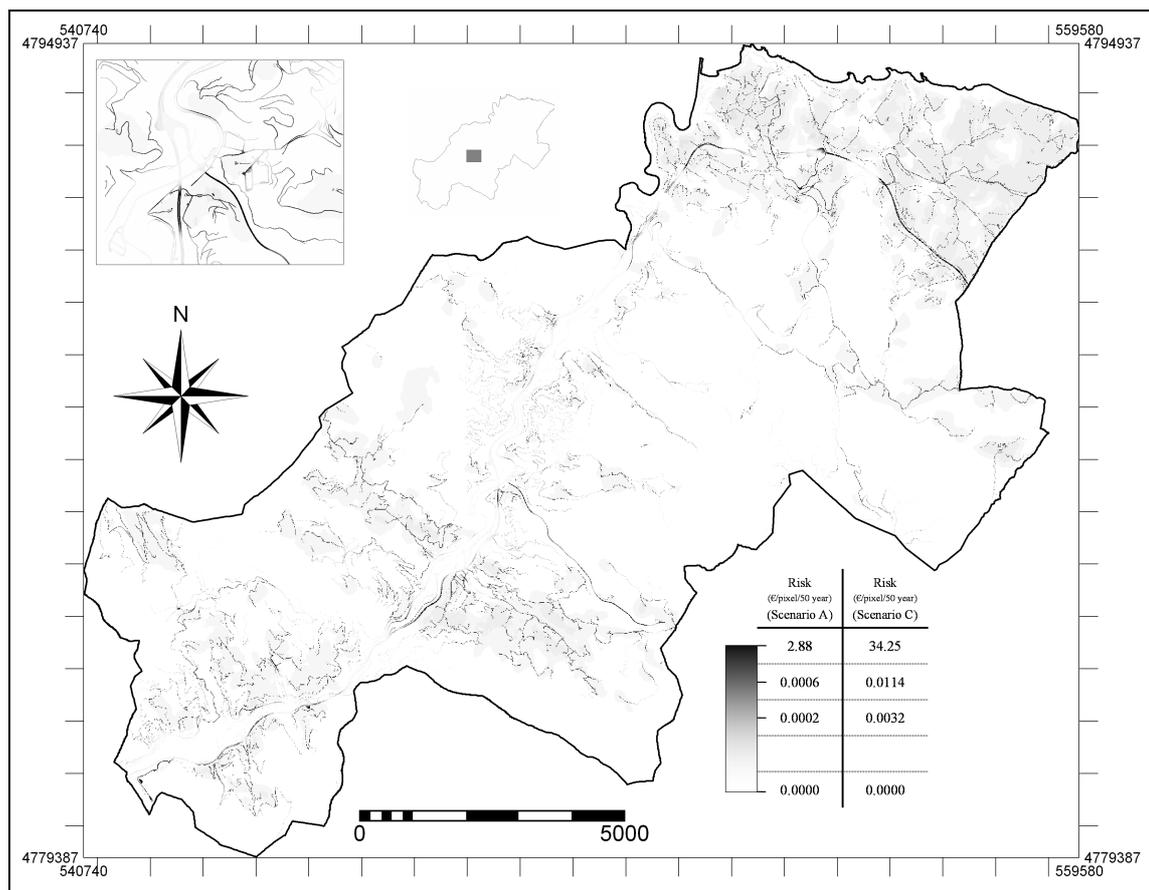


Figura 3.9. Ejemplos de mapa de riesgo total, para dos escenarios, propuesto por Remondo et al. (2005a).

3.5 Consideraciones finales

La mayoría de los trabajos anteriormente revisados presentan metodologías subjetivas y de carácter cualitativo, con lo cual la reproducción del método es complicada. Ello es debido, principalmente, a la falta de datos que puedan ser contrastados y validados, por lo que siempre se trabaja con aproximaciones y criterios de experto, a pesar de considerarse en ciertos casos las experiencias ocurridas en el pasado. La mayor parte de dichos trabajos tienen en cuenta los principales elementos vulnerables: infraestructuras, edificios, terrenos y población. Sin embargo, en muy pocos casos se considera la vulnerabilidad indirecta, la cual puede ser más importante que la directa. La vulnerabilidad indirecta es más difícil de estimar, ya que se han de considerar las pérdidas debidas a los efectos psicológicos o de salud que afectan a la población una vez que el proceso ha ocurrido, pérdidas debidas a una reducción de mercado como consecuencia de la disminución de ventas o por daños en bienes culturales imposibles de recuperar, etc. Estas pérdidas pueden tener lugar a corto, medio o largo plazo, por lo que su evaluación dentro de un estudio de riesgos es de difícil aplicación y se debe recurrir a un gran número de escenarios y hacer toda una serie de suposiciones. Como consecuencia de todo ello, apenas existen ejemplos de mapas de vulnerabilidad y los que existen suelen ser de carácter cualitativo. Esto hace que los mapas de riesgo que se obtienen a partir de la peligrosidad y vulnerabilidad tengan una expresión de carácter cualitativo y no expresen las pérdidas económicas esperables. En la Tabla 3.2 se resumen algunos de los principales valores de vulnerabilidad propuestos por distintos autores en sus trabajos.

Tabla 3.2. Valores de vulnerabilidad (expresados de 0 a 1) para diferentes elementos expuestos, propuestos por varios autores.

AUTOR	VULNERABILIDAD					
	Personas	Edificios	Infraestructuras	Usos del suelo	Personas en edificios	Actividad económica
<i>Fell (1994)</i>	0,005-1	0,025-1				
<i>Leone et al. (1996)</i>	0,001-1	0,01-1	0,05-1	0,1-1		0,1-1
<i>Fell & Hardford (1997)</i>	0,1-1	0,01-0,8				
<i>Finlay & Fell (1997)</i>	0,1-1				0,05-1	
<i>Hayne et al. (2001)</i>	0,05-0,9	0,25-1	0,3-1			
<i>Kong (2002)</i>	0,1-1				0,05-1	
<i>Blong (2003)</i>		0,02-1				
<i>Glade (2003a); Bell & Glade (2004)</i>	0,2-0,5	0,1-0,5	0,2-0,6	0,1-0,5	0,02-0,25	
<i>Remondo et al. (2004); Bonachea et al. (2004)</i>			0,09-0,68			

Con carácter general, un punto débil que afecta a la práctica totalidad de los métodos descritos es la ausencia de validación de las predicciones explícitas o implícitas que contienen, sobre la base de datos independientes. Esto es comprensible en el caso de los mapas de riesgo, debido a la dificultad de obtener datos independientes de los utilizados en los análisis, para contrastar los modelos. Es menos justificable, sin embargo, para los mapas de amenazas, pues en este caso se pueden aplicar estrategias de validación que permiten establecer la calidad o fiabilidad de los pronósticos que contienen (Chung & Fabbri, 2003b; Fabbri et al., 2003; Remondo et al., 2003b).