

# TEMA DEL DÍA

## RIESGOS GEOLÓGICOS: TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y MITIGACIÓN

### *Geological risks: analysis and mitigation techniques*

Miguel Llorente Isidro y Luis Laín Huerta (\*)

#### RESUMEN

Los riesgos geológicos son situaciones hipotéticas de posibles daños como consecuencia de un posible fenómeno natural para cuya comprensión es necesario integrar el conocimiento geológico. Existen muchos procesos geológicos que dan lugar a este tipo de situaciones, pero básicamente se clasifican desde un punto de vista geodinámico en riesgos internos y externos según sea el origen del proceso. Los análisis de riesgos geológicos se realizan con el propósito de reducir el impacto negativo de los procesos naturales sobre la vida de las personas y de sus bienes. El principal factor a estudiar en los análisis de riesgo es la fuente del riesgo, esto es, el peligro o el proceso geológico potencialmente peligroso (su severidad -magnitud e intensidad- y su frecuencia). Al igual que existen multitud de tipos de procesos geológicos peligrosos, también existen muy diversas técnicas de análisis y enfoques para cada uno de ellos, resultando ser el denominador común la recopilación, preparación e integración de datos de distintas fuentes y el ulterior análisis de los factores de peligrosidad para comprender los factores condicionantes, los desencadenantes y los umbrales o las clases de peligro. Las técnicas de mitigación comprenden medidas para reducir uno o varios de los parámetros que intervienen en la ecuación del riesgo, para lo que se pueden emplear medidas estructurales o medidas no estructurales, o una combinación de ambos tipos para lograr el nivel de protección buscado.

#### ABSTRACT

Geological risks are hypothetical situations in which damages are expected due to the possible occurrence of a natural phenomenon that requires a geological approach to properly understand it. There are many different processes that can cause such a circumstance though generally speaking they can be classified according to the Earth dynamics causing the phenomena, hence into internal or external risks. Risk analysis is undertaken in order to minimize negative impact on human life or property. The main factor to study in risk analysis is the source of risk, this is the hazard or the potentially dangerous geological phenomenon involved (its severity -magnitude and intensity- and its frequency). As well as there are many kinds of hazardous geological processes, there are also many diverse techniques and approaches that can be involved in their analysis, however all analysis share a common structure: data gathering, data pre-processing and data integration from different sources; determining factors of hazard, conditioning factors, triggering factors, and identifying thresholds or hazard classes. Mitigation techniques include measures focused on one or more of the variables in the risk equation, using structural or non structural measures or a combination of both to reach the desired level of protection.

**Palabras clave:** peligro, exposición, vulnerabilidad, preventivas, correctoras

**Keywords:** hazard, exposure, vulnerability, preventive, corrective

#### INTRODUCCIÓN

Los Riesgos Naturales son un tema de creciente interés, es decir, las inversiones son cada vez mayores de parte de las administraciones públicas y de los organismos privados para dar cumplimiento a las exigencias de una sociedad que cada vez tolera menos la inseguridad frente a los envites de la naturaleza. Sirva de ejemplo citar la reciente entra-

da en vigor de la Ley del Suelo (cuyo texto refundido se encuentra en el RDL 2/2008, de 20 de junio) y las reiteradas menciones que en ella se hacen a la obligatoriedad de contemplar los riesgos geológicos (Artículos 9, 10, 12 y 15) o las iniciativas puestas en marcha para dar cumplimiento a la Directiva Europea de inundaciones (Directiva 2007/60/CE; MARM, 2009).

(\*) Área de Investigación en Peligrosidad y Riesgos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España (MICINN), Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. [m.llorente@igme.es](mailto:m.llorente@igme.es); [l.lain@igme.es](mailto:l.lain@igme.es)

Por riesgos naturales se entenderá en este artículo (otras acepciones se pueden ver en Ayala y Olcina, 2002; IGME, 2006b) que se trata de una situación hipotética de daños (a personas o a sus bienes o servicios) provocados por un supuesto proceso natural (figura 1); mientras que por desastre o catástrofe natural se entiende la materialización de algún daño significativo derivado de la ocurrencia de un cierto proceso natural.

<b>Riesgo</b>	<b>Natural</b>	Extraterrestre	Radiaciones
			Meteoritos
			Gravitacionales
		Terrestre	Biológico
	Geológico		
	Atmosférico		
	<b>Antrópico</b>	Tecnológico	Transportes
			Instalaciones
		Financiero	Inversiones
			Proyectos
Social			
<b>Inducido</b>	Agravado		
	Desencadenado		

Fig 1. Clasificación de los orígenes de riesgo.

En España el riesgo ( $R$ ) se expresa en términos de valor económico y número de víctimas esperables por unidad de tiempo para un caso teórico de análisis, p.ej. €/año por inundaciones hasta  $P$  peligrosidad (severidad y frecuencia); personas/año por terremotos hasta  $P$  peligrosidad, etc., una cifra que resulta de la integral definida de cero a  $P$  para

una función dada de riesgo (Olcina y Ayala, 2002; figura 2). Sin embargo la dificultad que entraña la definición de la función del riesgo hace que normalmente se haga el análisis para un caso puntual, esto es, las pérdidas para un evento teórico de  $P$  peligrosidad. Por su parte, el desastre o la catástrofe se expresa en términos de valor de bienes asegurados y no asegurados; y en número de víctimas, de desaparecidos y de afectados; todo ello tras la ocurrencia del evento. Generalmente esta forma de evaluar los riesgos y las catástrofes se limita a evaluar daños directos (producidos durante el desarrollo del evento o incluso tras un pequeño lapso de tiempo) debido a que los daños indirectos (los que ocurren en efecto cadena) son muy dependientes de la actitud de la sociedad (p.ej. la pérdida de capacidad competitiva de una comunidad, la caída de valores en bolsa, etc) y su evaluación resulta muy compleja.

La distinción entre riesgo natural y riesgo antrópico se refiere al origen o a la causa o causas más inmediatas que podrían dar lugar a una hipotética situación de daño, con el objeto de ordenar el conocimiento, de racionalizar el reparto de competencias, o de localizar las fortalezas y debilidades frente a distintas situaciones. En un punto intermedio entre natural y antrópico se sitúan los riesgos inducidos en los que bien la actividad antrópica o bien la naturaleza sin ayuda del hombre, agrava una situación previa de riesgo o incluso la desencadena. Esta clasificación básica no es la única que se emplea en el ámbito de los riesgos naturales, ya que según la finalidad de distintos estudios existen diferencias que no siempre son exclusivamente de matices, véase por ejemplo la Base de Datos Internacional sobre Desastres (EMDAT, 2008).

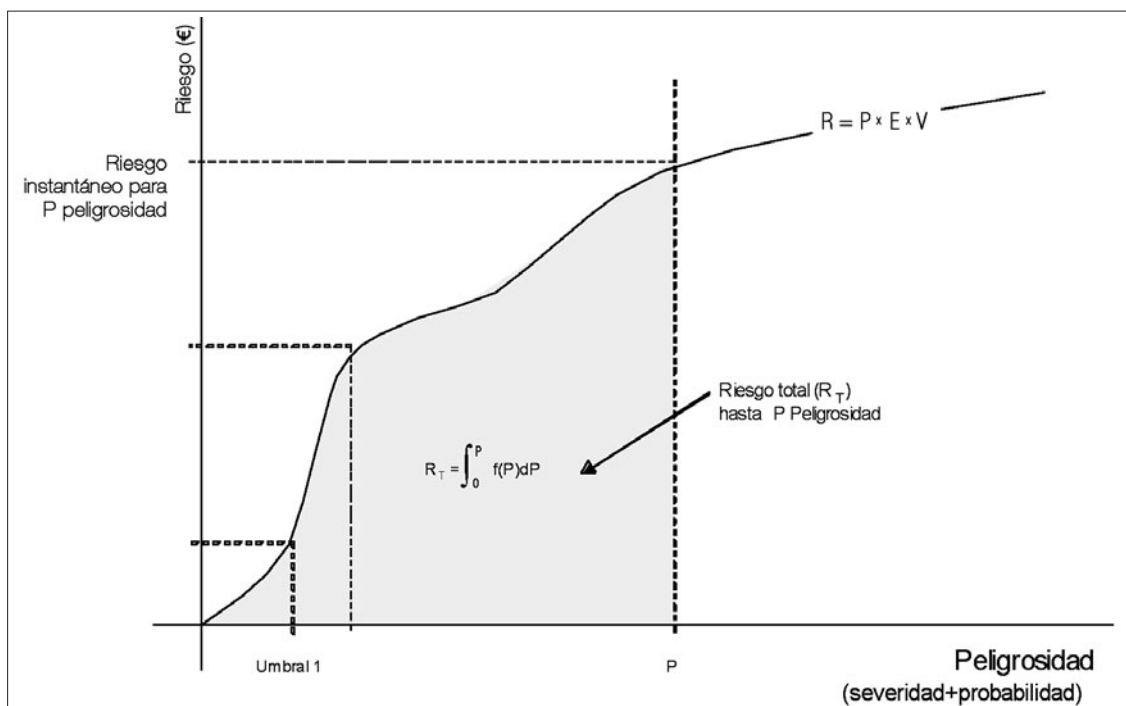


Fig 2. Hipotética función de riesgo (modificado de Olcina y Ayala, 2002).

Los riesgos geológicos hacen referencia a todos aquellos procesos naturales en los que interviene algún aspecto geológico de modo mayoritario o en el que entender la geología del fenómeno resulta imprescindible para una adecuada caracterización de dicho proceso y por tanto, del riesgo (figura 3).

Al proceso que da lugar a una situación de riesgo se le denomina “peligro”, un concepto que integra tanto la probabilidad de ocurrencia como la tipología, la magnitud y la intensidad del proceso, evaluando estos aspectos desde el punto de vista de su capacidad intrínseca para ocasionar daños. Así definidos estos términos (y sin perder de vista que existen otras interpretaciones) el peligro puede existir sin que haya elementos expuestos a él (el potencial destructivo es implícito al proceso) pero no existe riesgo si no hay elementos al alcance de un peligro o si éstos son invulnerables a él (Olcina y Ayala, 2002; figura 4).

<b>Riesgo Geológico</b>	Interno	Volcánico	Emisiones
			Explosiones
		Sísmico	Terremotos
			Tsunamis
	Externo	Litológico	Licuefacción
			Disoluciones
			Expansividad
			Diapirismo
			Radiaciones
			Hidrogeológicos
Superficial	Gravitacionales		
	Glaciares		
	Periglaciares		
	Fluvio-aluviales		
	Litorales		
	Eólicos		

Fig. 3. Clasificación de los orígenes de los riesgos geológicos.

## ANÁLISIS DE RIESGOS

Los estudios de riesgos naturales tienen por objeto último la reducción del riesgo desde valores inaceptables hasta valores aceptables. Qué se considera aceptable y qué no depende principalmente de factores tales como la situación económica y política de un país o la educación de las personas, lo que acaba expresándose en términos de inversiones en proyectos.

Un análisis de riesgos persigue contestar básicamente a cinco preguntas: 1) qué puede ocurrir (peligros); 2) cuándo puede ocurrir (probabilidad); 3) dónde puede ocurrir y a qué o quién puede afectar (exposición); y 4) cuánto costaría si ocurriera (vulnerabilidad y riesgo); y 5) cómo y hasta cuánto se puede reducir esa pérdida (mitigación de riesgos).

### Análisis de la peligrosidad geológica

Los análisis de peligrosidad geológica conducen a una evaluación cuantitativa o cualitativa de un fenómeno natural con potencial destructivo y pasan por dos fases, la recopilación de información previa y los análisis de los factores de peligrosidad.

**1. La recopilación de información previa** relativa al proceso y a los efectos asociados, es a menudo un proceso largo y tedioso para hacer acopio de información histórica (documentación de archivos, memorias, etc.), de información de paleo-eventos (registro geológico de eventos pasados), de información cartográfica (usos del suelo, topografía, etc.) y de otras fuentes de información complementarias (ya sean de tipo físico, químico, sociológico u otras fuentes). En esta información se apoyan los análisis de los factores de peligrosidad

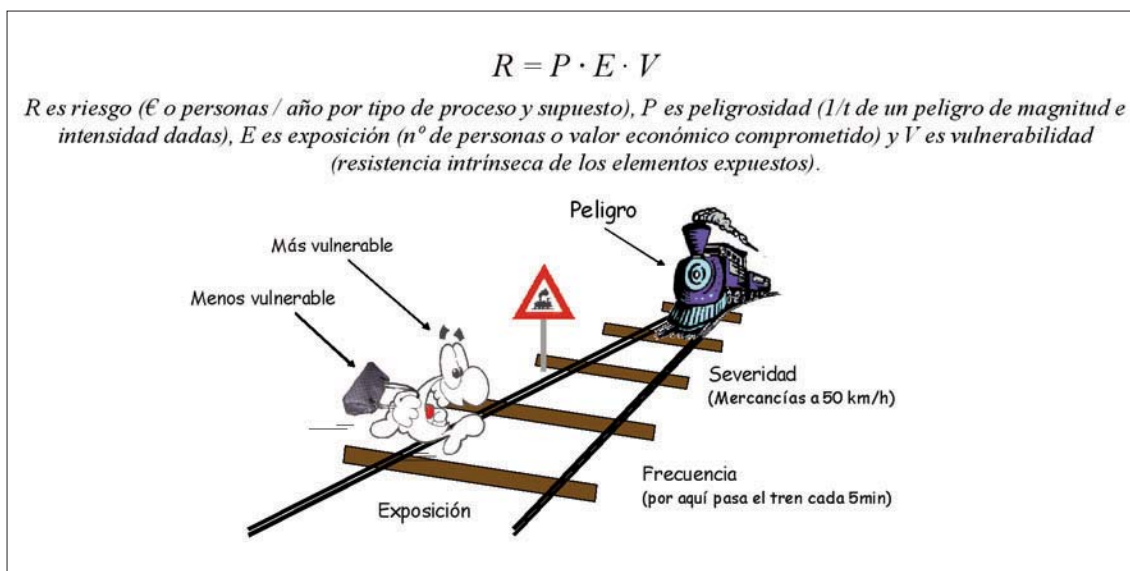


Fig. 4. Ecuación del Riesgo y ejemplificación de una situación de “riesgo”. Como indica la señal, el peligro es “el tren” (lo que incluye el tipo, velocidad, frecuencia, etc). Los elementos expuestos son aquellos que se encuentran bajo la posible influencia del peligro (en este caso aquello que esté en las vías del tren). La vulnerabilidad es la resistencia de un objeto ante un hipotético impacto. No hay riesgo si no hay exposición o si no hay peligro. Hay peligro (“hay tren”) aunque no haya exposición (“aunque no haya gente en las vías”). Hay vulnerabilidad aunque no haya peligro.

dad, de exposición y vulnerabilidad por lo que en gran medida determinan la metodología que se seguirá en dichos análisis, o cuando lo que prima es el método (al objeto de alcanzar una estimación apropiada para un caso concreto) la inversión más sustancial del proyecto no es raro que se dedique a esta fase. La calidad y cantidad de los datos previos condiciona la fiabilidad de los resultados, si bien algunas fuentes de información empiezan a ser tan voluminosas y con tan buena calidad que los métodos y las herramientas de análisis podrían ya estar muy lejos de poder aprovechar tal cantidad de datos, lo que en definitiva hace que las incertidumbres de otras variables resulte aún más llamativa.

**2. La fase de análisis de factores de peligrosidad** persigue identificar los condicionantes y desencadenantes de un proceso, y en su caso determinar valores umbrales característicos, así como evaluar la magnitud e intensidad (severidad) del mismo y evaluar la probabilidad de ocurrencia o la frecuencia con que tiene lugar el proceso.

Los resultados de todo análisis de peligrosidad moderno conducen a la elaboración de bases de datos georreferenciadas, es decir, a cartografías digitales, de distintos factores de peligrosidad, como por ejemplo la velocidad del proceso, su energía, su temperatura, etc., una cartografía a la que acompaña una memoria estructurada en la que se abordan cuestiones generales, se describe el procedimiento de análisis, se detallan las particularidades del estudio y se emiten unas conclusiones o consideraciones finales.

Las ciencias que intervienen en un análisis de peligrosidad son tan variadas como procesos se conocen, lo que conduce a que un estudio de este tipo esté compuesto necesariamente por un equipo multidisciplinar. Por otra parte, no existen procedimientos capaces de simular ni de representar apropiadamente más de un fenómeno al mismo tiempo, por lo que se estudia cada uno de ellos de forma aislada (IGME 2006). Veamos algunos ejemplos.

#### *Licuefacción*

La licuefacción de suelos requiere de la presencia de un tipo litológico muy concreto, esto es, un sedimento poroso no consolidado y saturado en agua, por ejemplo, arenas sueltas con un nivel freático muy cercano a la superficie. Este tipo de suelos es estable en condiciones normales porque cada grano de arena se apoya en otro u otros granos vecinos conformando así una estructura esquelética capaz de sostener elementos en su superficie. Pero ante la presencia de una vibración (por ejemplo de un terremoto) estos granos de arena comienzan a colisionar entre sí, pudiendo llegar a perder todo el contacto con otros granos y quedando embebidos en agua, lo que ocasiona un comportamiento del suelo similar al de un fluido, dando lugar a una compactación del terreno que puede ser muy significativa para las infraestructuras.

#### *Disoluciones*

La disolución de las rocas es un proceso lento de degradación de las mismas. El motor de disolución principal es el agua y los materiales más notablemente afectados son las rocas de naturaleza salina y carbonatada. Desde un punto de vista de los peligros geológicos, las disoluciones de las rocas pueden dar lugar a cavidades de distinto tamaño y forma, unas oquedades que pueden llegar a un grado de desarrollo tal que se produzca una inestabilidad del terreno por incapacidad estructural para sostener el techo de la cavidad, dando lugar a hundimientos más o menos acelerados. El más llamativo de los procesos de disolución es la karstificación debido a la geomorfología tan característica a la que da lugar, y desde el punto de vista de los riesgos, puede conducir a colapsos súbitos con pocos o ningún indicio superficial previo perceptible a día de hoy.

#### *Expansividad*

La variación volumétrica de las rocas como consecuencia de variaciones de humedad en la estructura cristalina es una cuestión de nuevo asociada al tipo litológico. Las rocas salinas y las arcillosas son las protagonistas en este caso. El verdadero problema asociado a la expansividad es su carácter irregular en porciones de territorio pequeñas, lo que origina características ondulaciones de la superficie y resquebrajamientos en paredes de edificios y carreteras que pueden llegar a ser muy notables. También constituyen un motor desencadenante de otros procesos, como por ejemplo los movimientos de ladera.

#### *Diapirismo*

Un diapiro es una masa de roca plástica (generalmente salina o arcillosa) que asciende por efecto de una diferencia de densidad con las rocas que encuentra sobre ella. El diapirismo es el mecanismo de ascenso de esa masa, lo que conlleva un ascenso del nivel del suelo justo por encima del diapiro y un hundimiento de las zonas colindantes. Este proceso suele ser lento pero puede afectar a extensiones significativas.

#### *Radiaciones*

Algunas rocas, principalmente en las graníticas, están enriquecidas en elementos cuya desintegración radioactiva puede afectar a la salud humana. El más significativo de estos procesos proviene de la descomposición de Radio ( $^{226}\text{Ra}$ ), que libera el gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y que a su vez se desintegra a plomo ( $^{210}\text{Pb}$ ). El gas radón, mucho más pesado que los gases atmosféricos, se acumula en la superficie en ambientes cerrados y a ras de suelo o por debajo de él en sótanos y semisótanos. En EEUU se considera la segunda fuente de cáncer de pulmón después del tabaco (EPA, 2008).

#### *Gravitacionales*

Bajo este nombre se intenta englobar a un conjunto muy variado de movimientos del terreno en los que la fuerza de la gravedad es el motor princi-

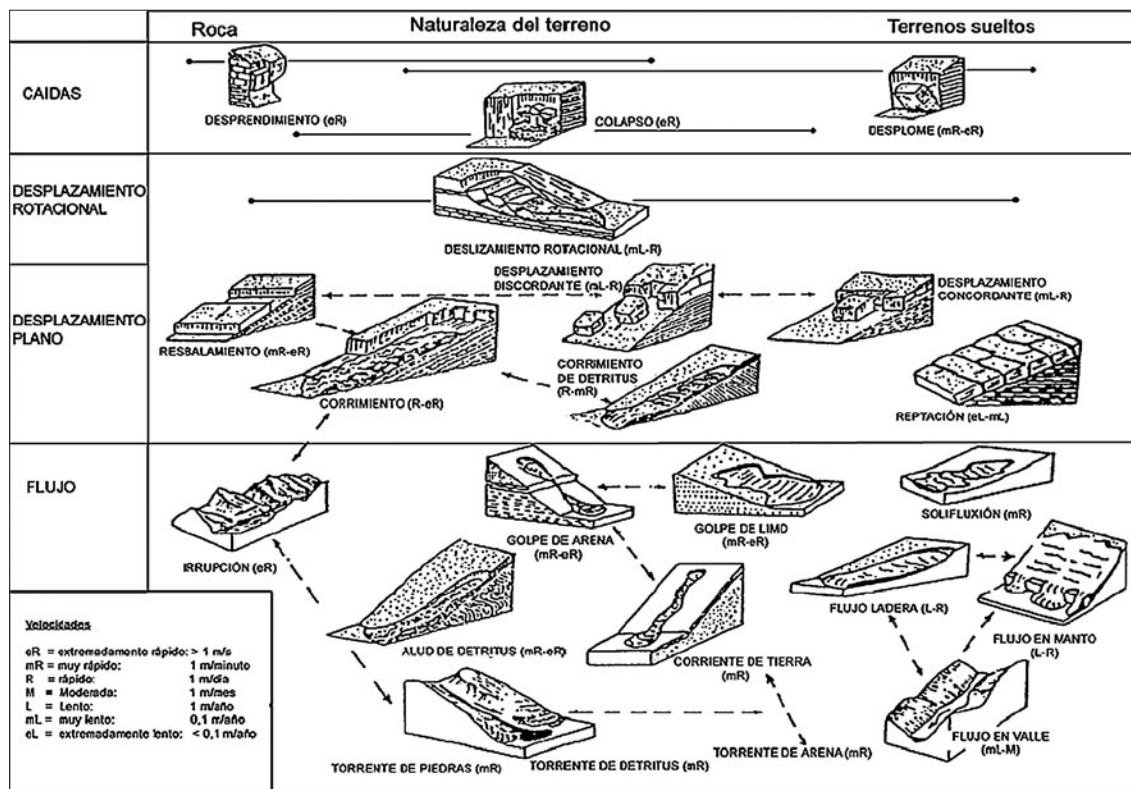


Fig. 5. Clasificación de los movimientos de ladera (García Yagüe, 1988).

pal del fenómeno. Quizá la clasificación más utilizada sea la de Varnes 1978 o sus posteriores modificaciones (figura 5), que presentan en una tabla el cruce entre el tipo de material (desde material suelto a roca) y el tipo de movimiento (desde caídas a flujos).

#### Fluvio-aluviales

La dinámica fluvial, o fluvio-aluvial, se refiere a los procesos que intervienen en la escorrentía superficial, es decir, al discurrir del agua por la superficie terrestre, provenga ésta de lluvias o de rotura de represamientos u otras fuentes, de tal suerte que el fluido termina por concentrarse en vaguadas en forma de regueros, riachuelos, arroyos, torrentes, ríos, ramblas, etc. La frontera entre los procesos gravitacionales y los fluvioaluviales no siempre está clara, pues los ríos constituyen el principal agente erosivo y de transporte de materiales, pudiendo en ocasiones encontrarse con torrentes, ramblas o rieras, en los que más del 50% en volumen del caudal circulante resultan ser roca o materiales sólidos de otra naturaleza (ramas y detritos de todo tipo).

#### Análisis de la exposición

El análisis de la exposición persigue determinar la presión a la que están sometidos los elementos del territorio y el valor de cada uno de estos elementos. Este análisis consta de tres fases: el cruce (mediante un Sistema de Información Geográfica, SIG) de BBDD (bases de datos) de alcance de la peligrosidad con las BBDD planimétricas (catastro, infraestructuras, etc); la investigación de los valores de los ele-

mentos expuestos; y el cruce de las BBDD de factores de peligrosidad con los elementos expuestos.

En el cruce de las BBDD de alcance de la peligrosidad intervienen cartografías en las que se contemple el alcance areal máximo del proceso para el caso o casos de estudio y las BBDD de los elementos del territorio, para posteriormente identificar el nivel de peligrosidad para cada uno de ellos. El objetivo de esta primera fase es acotar y minimizar la inversión o el esfuerzo a realizar en la fase siguiente de valoración de elementos expuestos.

La fase de valoración de los elementos expuestos sirve para abstraer a un valor (lo más próximo al de mercado) a cada una de las entidades concretas del territorio expuestas al peligro. Esta cifra tiene en cuenta el estado de salud de las infraestructuras, pero rara vez tiene en cuenta el grado de amortización. Cuando los elementos a tasar son objetos de valor incierto, tales como edificios históricos o singulares, obras de arte, o elementos con un valor añadido (sentimental, ético, museístico) la cuantificación se aborda en términos de unidades específicas (p.ej., tantas obras de tal artista).

En lo que se refiere a personas expuestas se recurre a la información del padrón municipal o mediante encuestas para hacer una estimación no sólo del número de personas, sino también del grupo poblacional al que pertenecen en términos de edad, sexo, salud y educación, entre otros. Al contrario de lo que ocurre con las infraestructuras, donde puede interesar una estimación de valor económico asociado a una posición concreta en el espacio, con las

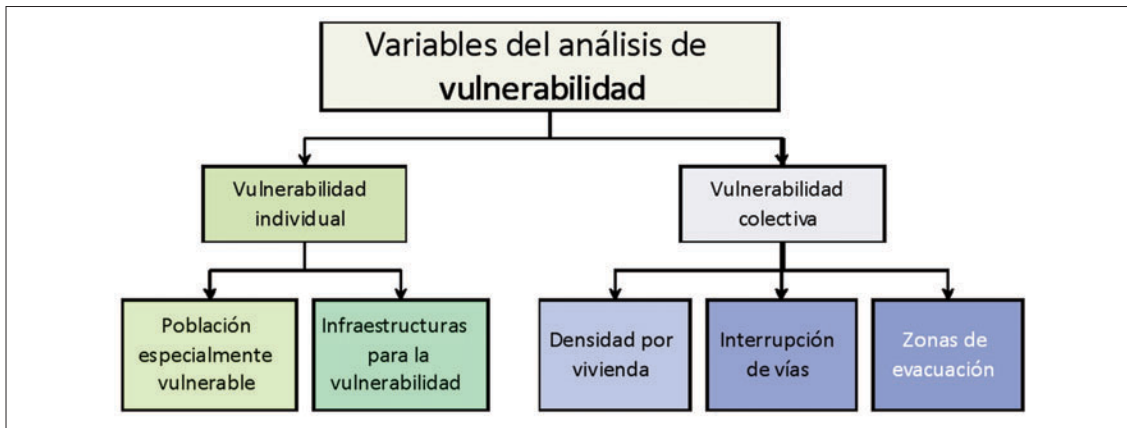


Fig. 6. Esquema de vulnerabilidad social. Modificado de IGME 2008b.

personas se restringe el análisis de exposición a una expresión estadística, principalmente para garantizar la protección de los datos personales, pero también porque la movilidad geográfica de las personas imposibilita una correlación espacial fiable salvo para algunos grupos concretos (hospitalizados, residencias de la tercera edad) o para algunos índices (densidad de población, natalidad).

#### Análisis de la vulnerabilidad

Los análisis de vulnerabilidad se realizan para determinar el grado de afección porcentual más probable de un elemento frente a una hipotética presión. Así por ejemplo, se ensaya en laboratorio la resistencia de materiales y de estructuras, o se evalúa la capacidad de respuesta de la población mediante encuestas o estadísticas para sentar las bases y poder hacer con ello agrupaciones de tipos de elementos desde la perspectiva de su resistencia.

La vulnerabilidad concierne tanto a individuos (vulnerabilidad social, figura 6) como a comunida-

des (resiliencia), a infraestructuras y edificaciones, y a comunicaciones y servicios (vulnerabilidad de infraestructuras). Todos los tipos de vulnerabilidad se retroalimentan por la dependencia intrínseca de unos en otros, lo que hace que en ocasiones se confundan los análisis de vulnerabilidad con los propios análisis de riesgo o que se deriven actuaciones de prevención ante la identificación de valores de vulnerabilidad muy altos independientemente de su exposición.

#### MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Como ya se ha indicado anteriormente, los análisis de riesgo y de peligrosidad tienen por objeto último la reducción del riesgo, lo que implica la adopción de medidas de mitigación o medidas paliativas que se apoyen en estos estudios. Estas medidas se pueden clasificar en dos grandes grupos (figura 7), aquellas en las que se anticipan las previsiones de riesgo o de peligrosidad (medidas preventivas); y aquellas que se adoptan durante un evento

Medidas de mitigación	Preventivas	Estructurales	<b>Barreras</b> ( <i>muros, diques, presas, pantallas</i> ) Elementos de <b>refuerzo</b> ( <i>bulones, escolleras</i> ) Canalizaciones, excavaciones y otras <b>actuaciones duraderas</b>
		No estructurales	<b>Educación</b> y concienciación social ( <i>formación, información</i> ) <b>Legislación</b> sectorial ( <i>ambiental, territorial</i> ) <b>Ordenación</b> y gestión territorial ( <i>reforestación, recalificación</i> ) <b>Planes</b> de protección civil y emergencias Sistemas de <b>seguros</b> y reaseguros Sistemas de aviso y <b>alerta</b> ( <i>paneles informativos, alertas tempranas</i> )
	Correctoras	Estructurales	<b>Barreras</b> Reconstrucciones y <b>refuerzos</b> provisionales Canalizaciones, excavaciones y otras <b>actuaciones provisionales</b>
		No estructurales	<b>Evacuación</b> ( <i>salvamento y socorrismo</i> ) Atención <b>médica</b> ( <i>primeros auxilios y hospitales de emergencia</i> ) Pago de <b>indemnizaciones</b> ( <i>seguros y reaseguros</i> ) Declaración de zona catastrófica y <b>otras medidas financieras</b>

Fig. 7. Tipos de medidas de mitigación.

(desastre o catástrofe) o tras la ocurrencia del mismo para evitar males mayores (medidas correctoras). También se pueden clasificar en función de si implican la ejecución de una obra civil (medidas estructurales) o si por el contrario se apoyan en cuestiones más sutiles, tales como la educación, la ordenación del territorio, la legislación sectorial o los sistemas de alerta temprana (medidas no estructurales, figura 7).

Las medidas más eficaces son las preventivas según un estudio del US Army Corps of Engineers (2003) en el que se concluye que por cada dólar invertido en prevención se evitan perder más de seis en eventos en EEUU (figura 8); otro estudio más reciente en el mismo país (FEMA, 2005) reafirma este punto, apuntando para el caso de las inundaciones que la relación es de unos 4\$ por cada 1\$ invertido.

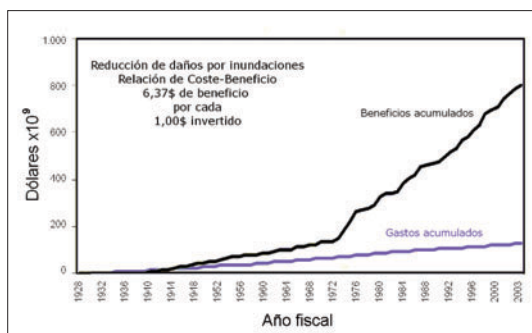


Fig. 8. Gráfica de coste-beneficio de EEUU para medidas de prevención de inundaciones. Modificado de US Army Corps of Engineers (2003). Nótese que en 1974 se promulgó la Ley de Ayuda en Desastres.

Las medidas preventivas se complementan o se asocian con las correctoras, por ejemplo, los sistemas de seguros se establecen con carácter preventivo o disuasorio (con primas más elevadas en función del grado de peligrosidad) y su efecto corrector se materializa en el pago de las indemnizaciones correspondientes; los sistemas de aviso y alerta temprana se implantan con carácter preventivo y su efecto corrector se materializa con la evacuación de las personas, lo que a su vez requiere de un plan de protección civil y emergencias que disponga del protocolo de evacuación y garantice la disposición de los medios necesarios. Si bien algunas medidas pueden establecerse y operar de forma aislada (una canalización o una presa) su efectividad aumenta muy significativamente cuando se complementan con otras medidas en un marco contextual general basado en el conocimiento del medio (prevención de erosión de suelos, reforestación).

Otra forma de clasificar o de entender las medidas de mitigación se basa en indicar cuál es el factor sobre el que influye, es decir, medidas anti-peligrosidad, anti-exposición o anti-vulnerabilidad.

Las medidas anti-peligrosidad persiguen reducir la severidad (su magnitud o su intensidad) o la frecuencia de un proceso, lo que se puede lograr con



Fig. 9. Pantalla dinámica deteniendo un bloque desprendido (Geobrugg, 2009).

medidas estructurales (figura 9) o con medidas no estructurales (p.ej. protegiendo espacios para la amortiguación de procesos naturales en regiones deshabitadas).

Las medidas anti-exposición estructurales implican el traslado del peligro de una región a otra, como por ejemplo las canalizaciones o encauzamientos (figura 10). Las medidas anti-exposición no estructurales pueden incluir los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) o simples avisos a la población (figura 11) o la legislación de usos del suelo.



Fig. 10. Canalización en la rambla de Albuñol.



Fig. 11. Cartel de aviso en el que se puede leer: Zona peligrosa por tsunamis, en caso de terremoto acuda a terrenos elevados o hacia tierra adentro.

Las medidas anti-vulnerabilidad implican el uso de materiales y métodos más resistentes. Quizá el ejemplo más representativo a este respecto lo constituya Japón con sus estrictas normas constructivas (medida no estructural) para garantizar que las vibraciones del terreno ocasionadas por los frecuentes terremotos no resulten en una deformación frágil de los edificios. Otro ejemplo es el diseño con una fuerte pendiente de los tejados en regiones montañosas donde se producen copiosas precipitaciones



Fig. 12. Clásica construcción con tejado de alta pendiente para evitar hundimientos del techo por acumulación de nieve.

en forma de nieve y cuya acumulación en los tejados puede resultar en una sobrecarga insostenible en un techo con un diseño plano (figura 12), una norma constructiva que también es aplicada para acumulación de cenizas volcánicas.

#### Ventajas de las medidas estructurales y no estructurales

Las medidas de mitigación estructurales son especialmente útiles allí donde existe un elemento que debe ser protegido de eventos muy frecuentes pero de poca magnitud e intensidad o que por el motivo que fuere (estratégico, histórico, cultural) no puede salvaguardarse de otro modo (por ejemplo, el suelo urbano consolidado). El problema de su aplicación generalizada radica en que suelen generar un severo impacto ambiental, tanto por la ejecución de la obra y el elemento constructivo en sí como por interferir en los sistemas naturales, incrementando de este modo la variabilidad o inestabilidad de su comportamiento; pero más grave si cabe es que crean una falsa sensación de seguridad. Todas las medidas estructurales se dimensionan para un caso hipotético de magnitud e intensidad dadas y bajo unas premisas determinadas de mantenimiento y conservación de las obras. Superado ese umbral de diseño, o no cumpliéndose alguna de las condiciones de mantenimiento, la protección desaparece, pero no así la falsa sensación de seguridad de las poblaciones establecidas junto a estas obras (figuras 13 y 14). Además, aplicar



Fig. 13. Rotura de un dique de protección del río Misisipi durante la crecida de 1927. (Frankenfeld, 1927).

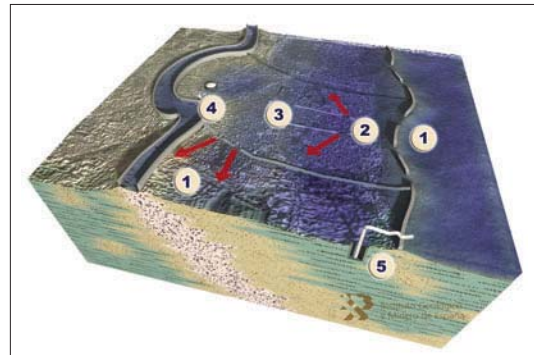


Fig. 14. Esquema explicativo de la inundación de Nueva Orleans (entre el río Misisipi y el lago Pontchartrain) del año 2005 tras el paso del huracán Katrina. La destrucción de los diques del lago y los canales en varios puntos (1) produce el anegamiento de gran parte de la Ciudad, preferentemente las zonas más bajas de la antigua marisma (2), quedando menos o nada sumergidas las posiciones de los antiguos diques (Gentilly Ridge, 3) y el antiguo barrio francés (4), situado en la elevación del dique natural del Misisipi; la interrupción del bombeo (5) agrava la situación.

medidas estructurales a eventos de alta severidad y baja probabilidad resulta muy costoso y su efectividad es discutible, no sólo por la posibilidad de que se supere el umbral de diseño, sino porque esa cifra umbral suele apoyarse en métodos de estimación con un nivel de incertidumbre muy elevada, y por tanto, la obra fácilmente queda subdimensionada (y su consiguiente menor protección) o sobredimensionada (y la subsiguiente pérdida de aprovechamiento del suelo).

Las medidas no estructurales son en general medidas de muy bajo coste y muy rentables, especialmente en el medio y largo plazo. Su principal ventaja radica en un incremento en la protección del medio natural y en un mejor aprovechamiento del suelo, conforme con los procesos naturales que en él ocurren. Sin embargo, pueden ser difíciles de aplicar en ciertas circunstancias, o incluso no aplicables para salvaguardar determinadas infraestructuras que por el motivo que fuere se encuentran o han de encontrarse en una zona expuesta, por ejemplo, la necesidad de refrigeración de los reactores de las centrales nucleares conlleva a que éstas se sitúen en una zona de fácil abastecimiento de agua fría, lo que puede situarlas en una zona de inundación en condiciones naturales.

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT, figura 15) son medidas que se adoptan para proteger la vida de las personas donde de antemano se sabe que están expuestas a un determinado peligro, debiendo emplearse allí donde los daños económicos que pudiera sufrir dicha población tanto en servicios como en competitividad o infraestructuras, no sea significativo, bien porque las inversiones son menores o porque ya se consideren amortizadas o por-



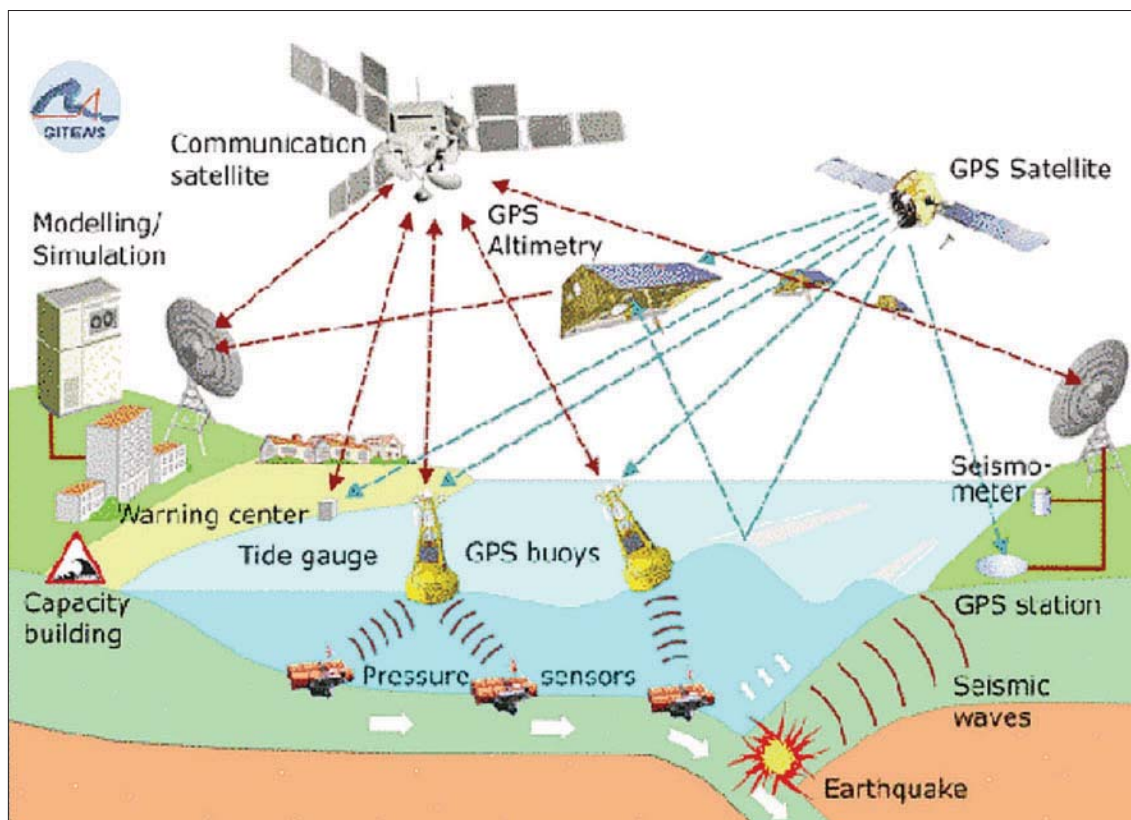


Fig. 15. Descripción del SAT Germano-Indonesio de tsunamis (German Indonesian Tsunami Early Warning System, GITWES). Tomado de [www.gitwes.org](http://www.gitwes.org) (2009).

que existan otras medidas destinadas a minimizar esos efectos.

El fundamento de estos sistemas es monitorizar o hacer un seguimiento de un proceso o de mecanismos precursoros o indicadores, con el objeto de dar un aviso a la población con tiempo suficiente como para que ésta se ponga a salvo o incremente su seguridad de forma significativa. Los SAT son sistemas complejos que implican instrumentación para la observación del proceso o procesos, un protocolo rápido de tratamiento de la información que se recibe de los instrumentos en tiempo real o casi real y un mecanismo e infraestructura claras de comunicación entre los observadores del fenómeno y las autoridades competentes para emitir una alerta, para lo que a su vez se requiere también de una cierta infraestructura. Una vez alertada la población debe existir un mecanismo basado en Protección Civil (desde el nivel de autoprotección hasta el nivel más elevado) para apoyar la evacuación. El principal inconveniente de este tipo de medidas es que existen multitud de procesos que difícilmente se pueden anticipar con tiempo suficiente como para permitir un protocolo de actuación tan complejo. En otras ocasiones son difícilmente aplicables no tanto por la celeridad del evento, sino por la incertidumbre en cuanto al lugar en que se pueda desencadenar dicho proceso, como sería el caso de muchas laderas inestables. Aún hay otros procesos en los que la falta de co-

nocimiento o de medios hace que sea imposible a día de hoy una monitorización o modelización en tiempo real precisa que permita anticipación suficiente.

## RETOS EN EL ANÁLISIS Y LA MITIGACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS

Aún son muchos los avances que hay que realizar en el marco de los riesgos geológicos, desde mejorar los modelos conceptuales (aún imperfectos), hasta mejorar los modelos de análisis matemático que están muy simplificados porque los modelos numéricos que les acompañan pueden ser demasiado exigentes en términos de cálculo. Además hay que mejorar la correlación entre distintos tipos de aproximaciones y metodologías, al objeto principal de incrementar la cantidad y calidad de los datos de partida. Otro reto significativo es la integración de las incertidumbres asociadas al cambio global y cómo éste cambio afectará a la ocurrencia de procesos naturales potencialmente dañinos. En materia de predicción también se están haciendo importantes esfuerzos, investigando tanto en procesos precursoros como en mecanismos de detección y modelización. Por último, pero no menos importante, aún hay que mejorar los programas de educación, de formación, de información y de concienciación social, lo que debe conducir a una mayor aplicación de medidas no estructurales.

## BIBLIOGRAFÍA

Ayala, F.J. y Olcina, C. (coords. 2002): *Riesgos Naturales*. Ed. Ariel Ciencia. Barcelona. 1512 pp.

Dwyer, A.; Zoppou, C.; Nielsen, O.; Day, S. y Roberts, S. (2004): *Quantifying Social Vulnerability: a methodology for identifying those at risk to natural hazards*. Australian Geological Survey. Australia. 101 pp.

EMDAT (2008): International Emergency Disasters Database. URL: <http://www.emdat.be/>.

EPA (2008): *Manual Informativo sobre El Radón*. Environmental Protection Agency. Estados Unidos. En <http://www.epa.gov/>. 16 pp.

FEMA (2005): *Natural Hazard Mitigation Saves, an Independent Study to Assess the Future Savings from Mitigation Activities*. EEUU. Volumen 1: Findings, Conclusions, and Recommendations. 377 pp. PDF Disponible en <http://www.floods.org>.

Frankenfeld, H. C. (1927): *The Floods of 1927 in the Mississippi Basin*. Monthly Weather Review Supplement 29.

García Yagüe A. (1988): *Clasificación tipológica de los movimientos de laderas*. II Simp. Nac. Sobre taludes y laderas inestables. Andorra la Vella. 152-160.

Geobruigg (2008): *Barreras contra caídas de rocas: Red de anillos ROCCO* ®. <http://www.geobruigg.it>. Italia.

GITWES (2009): *German Indonesian Tsunami Early Warning System*. <http://www.gitwes.org>

IGME (2004): *Mapas de peligrosidad geológica en el término municipal de albuñol (Granada)*. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid. 162 pp. Informe inédito.

IGME (2006a): *Cartografía de Peligrosidad Volcánica de la isla de Tenerife*. Memoria de proyecto del Insti-

tuto Geológico y Minero de España. Ministerio de Educación y Ciencia. 164. pp.

IGME (2006b): *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones; métodos, experiencias y aplicación*. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid. 230 pp.

IGME (2008a): *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones, guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid.

IGME (2008b): Análisis del riesgo de inundación para planes autonómicos de protección civil: RICAM. En: IGME; *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*. IGME y CCS, 53-70.

MARM (2009): *Sistema Nacional de Zonas Inundables*. Ver <http://www.mma.es>.

Olcina, C. y Ayala, F. J. (2002): *Riesgos Naturales. Conceptos fundamentales y clasificación*. En: Ayala, F. J. y Olcina, C. (coords. 2002): *Riesgos Naturales*. Ed. Ariel Ciencia. Barcelona. 41-74.

US Army Corps of Engineers (2003): *Annual flood damage report to congreso for Fiscal Year 2003. Includes statistical data 1993-2003*. EEUU. 30pp.

USGS (2000): Volcanic Hazards Program. URL: <http://volcanoes.usgs.gov/>.

Varnes D. J. (1978): *Slope movement types and processes*. En: Schuster R. L. & Krizek R. J. Ed., Landslides, analysis and control. Transportation Research Board Sp. Rep. No. 176, Nat. Acad. of Sciences, 11-33. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 4 de diciembre de 2008 y aceptado definitivamente para su publicación el 22 de mayo de 2009.*