

# Escenarios urbanos de impacto sísmico

J. Badal<sup>1</sup>, M. Vázquez-Prada<sup>1</sup> y Á. González<sup>2</sup>

1 Física de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Ciencias B, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza. badal@unizar.es

2 Dep. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Ciencias C, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.

## ABSTRACT

*Prognostic estimations of the expected number of killed or injured people and about the approximate cost associated with the damages caused by earthquakes are made following a suitable methodology of wide-ranging application. For the assessment of human life losses we use a least-square regression model between earthquake magnitude and casualties for the most frequently met population density groups. We too use an approach based on the local social wealth to obtain a rough estimate of the economic loss, which is finally computed on the basis of the relationship of the macroseismic intensity to the economic loss in percentage of the wealth. The application is implemented using geographic information system software. Some urban concentrations in Spain with different population density are considered for computation, thus contributing to an easier taking of decisions in emergency preparedness planning, contemporary earthquake engineering and seismic risk prevention.*

**Key words:** earthquake casualties and damages, urban nuclei, Spain.

## INTRODUCCIÓN

Los terremotos se convierten en un importante factor de riesgo para la sociedad cuando inciden sobre poblaciones vulnerables. De acuerdo con los datos mundiales disponibles, durante el siglo XX medio millar de terremotos aproximadamente fueron la causa de más de 1.615.000 víctimas humanas (Samardjieva y Badal, 2002). Pero, además, los terremotos destructivos con frecuencia originan pérdidas económicas de importancia. En este contexto, un problema adicional cuando se lleva a cabo un análisis de daños es la determinación del quebranto o coste económico derivado de una fuerte sacudida sísmica. Una evaluación prospectiva de las consecuencias de un fuerte acontecimiento sísmico es, por tanto, una tarea muy importante para tener conocimiento del desastre que puede suceder, sobre todo en el ámbito de la prevención y de la reducción de riesgos naturales. El objetivo de este artículo es estudiar ambos aspectos de riesgo sísmico en el caso de núcleos urbanos, que conciernen a hipotéticos escenarios de impacto sísmico, y en última instancia contribuir con cifras a la política y al control de emergencias en nuestro país.

## METODOLOGÍA

Las estimaciones de pronóstico del número de víctimas humanas y del coste económico aproximado en determinadas áreas urbanas se realizan siguiendo una adecuada y fácilmente comprensible metodología para el análisis de pérdidas provocadas por un sismo. A continuación damos una breve descripción del método aproximado que utilizamos.

## Intensidad epicentral

Esta variable se calcula a partir de un modelo de regresión propuesto por Samardjieva *et al.* (1999) para terremotos ibéricos, el cual estima la magnitud  $M$  de un terremoto en función de la intensidad epicentral  $I_0$  ( $\geq VI$ , MSK) y de la profundidad focal  $h$  ( $\leq 30$  km) del sismo. El mejor ajuste lineal de los datos disponibles condujo a la ecuación:

$$M(I_0, h) = 0,53 I_0 + 0,34 \log h + 0,75$$

## Ley de atenuación

La distribución de la intensidad sísmica sobre la superficie terrestre, que se muestra en los mapas de isosistas, viene influenciada por factores geológicos y tectónicos, incluso por las pequeñas irregularidades del medio, pero sobre todo depende del tamaño del terremoto y de la profundidad de su foco, de la variación azimutal del patrón de radiación de la fuente y de la atenuación de la sacudida sísmica con la distancia. Con respecto a la atenuación de la energía y por ende de la intensidad macrosísmica con la distancia hipocentral ( $\Delta$ ) en la Península Ibérica, hacemos uso de las relaciones para el movimiento del suelo propuestas por López-Casado *et al.* (2000):

$$I = f(I_0) - a_2 \ln \Delta - a_3 \Delta \quad , \quad f(I_0) = a_{10} + a_{11} I_0 + a_{12} I_0^2$$

donde  $a_2$  y  $a_3$  representan los términos relacionados con la extensión geométrica y la disipación de energía, respectivamente, y  $f(I_0)$  es una función cuadrática elegida teniendo

en cuenta el mejor ajuste de los datos disponibles. Todos los coeficientes son conocidos. Esta ecuación describe, en correspondencia con la tendencia de atenuación, la amplitud del movimiento del suelo (intensidad sentida  $I$ ) en términos de la intensidad máxima ( $I_0$ ), aquí equiparada a la intensidad epicentral, y de la distancia  $\Delta$ .

### Cálculo de víctimas

Seguimos el método desarrollado por Samardjieva y Badal (2002), de aquí en adelante el método SB, para estimar el número esperado de pérdidas de vidas humanas. El método SB se apoya en el número de víctimas catalogado después de un terremoto destructivo, ocurrido en cualquier lugar del mundo a lo largo de todo el siglo XX. El método, ya aplicado para Granada (España) y Kobe (Japón), se basa en un modelo cuantitativo que combina la magnitud  $M$  del terremoto, la densidad de población  $D$  en diferentes partes del territorio afectado y las dimensiones de las áreas con distinta intensidad macrosísmica. Para computar el número de pérdidas humanas  $N_k$  utilizamos ecuaciones de regresión del tipo:

$$\log N_k(D) = a(D) + b(D) M$$

donde los coeficientes  $a$  y  $b$  son parámetros de regresión que dependen de la densidad de población media del área afectada, previamente calculados para los intervalos de densidad de mayor frecuencia en el mundo ( $D < 25$ ,  $D = 25-50$ ,  $D = 50-100$ ,  $D = 100-200$  y  $D > 200$  habitantes/km<sup>2</sup>). El número esperado de personas heridas  $N_{inj}$  se puede computar por medio de una relación análoga sugerida por Christoskov y Samardjieva (1984) que conduce a la ecuación:

$$\log (N_{inj}/N_k) = -0,99 + 0,21 M$$

### Tasa de siniestralidad

La proporción del número de personas fallecidas en relación con la población total define esta tasa, que se puede calcular fácilmente dividiendo el número de víctimas por el de habitantes de la región afectada. En el presente estudio mostramos su variación para algunas concentraciones urbanas con diferente densidad de población.

### Aproximación a la riqueza social

Para computar el coste económico derivado de los daños causados por un terremoto modelo, seguimos el método desarrollado por Chen *et al.* (1997), que parte de la hipótesis de proporcionalidad entre obras e instalaciones debidas a la iniciativa humana, en cierto modo con dependencia de la densidad de población, y la riqueza social de un lugar estimada por medio del producto interior bruto (GDP) y la inversión pública (*investment*).

### Función de daños y coste económico

El último paso para completar la valoración cuantitativa que nos proponemos lo llevamos a cabo sobre la base de la relación existente de la intensidad macrosísmica – escala MM – con el quebranto económico sobrevenido en porcentaje de la riqueza. Para ello consideramos la función de daños  $f(I)$  facilitada por el Munich Reinsurance Group (2000), en realidad una banda de daños que expresa la incertidumbre en el coste esperado como consecuencia de los diferentes comportamientos de edificios y estructuras ante una crisis sísmica. La pérdida económica puede calcularse por medio de la fórmula

$$\text{costo} = \sum f(I) * \text{GDP}_{\text{cell}} * [\% \text{ inversión} / 100]^{-1}$$

donde la suma se extiende a todas las celdillas que conforman la partición del área investigada.

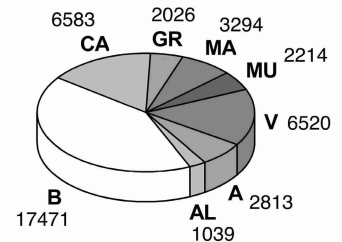
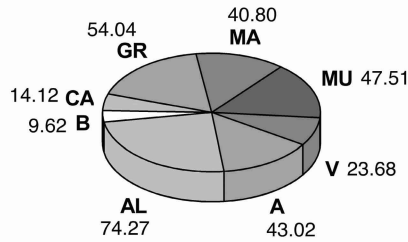
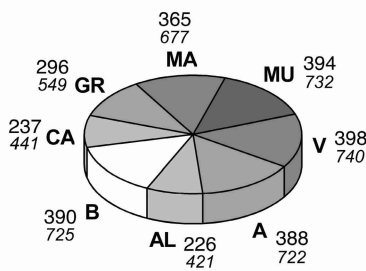
### IMPLEMENTACIÓN

La aplicación se ha diseñado para prever las consecuencias y el impacto de un hipotético terremoto de magnitud y coordenadas dadas, de acuerdo con un patrón de atenuación de la energía sísmica, y ha sido implementada con la ayuda de una base de datos geo-referenciada en un entorno de información geográfica, lo que se conoce como GIS. Hacemos uso de datos de densidad de población referida al año 1995. Los datos territoriales y de población los hemos tomado del Center for International Earth Science Information Network (2000). Hemos utilizado la versión de esta base de datos que tiene en cuenta las previsiones de Naciones Unidas sobre el crecimiento de la población. La inversión pública, habitualmente dada como porcentaje del producto interior bruto nacional, es una variable económica relativamente estable y un dato bien conocido para la mayoría de los países (World Bank, 2003). Hemos tomado el producto interior bruto y la inversión pública para España, con referencia al año 1995, del Instituto Nacional de Estadística (2003) y del World Bank (2003): 437.787,73 millones de euros y 21,41%, respectivamente. Como función de daños hemos considerado la facilitada por el Munich Reinsurance Group (2000). Finalmente, la información digital sobre fronteras y costas, necesaria para realizar los pronósticos, la hemos tomado de la fuente Penn State University Libraries' Digital Chart of the World Server (1992).

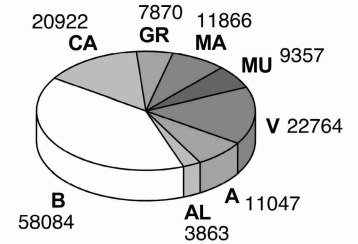
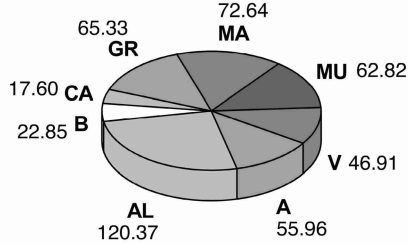
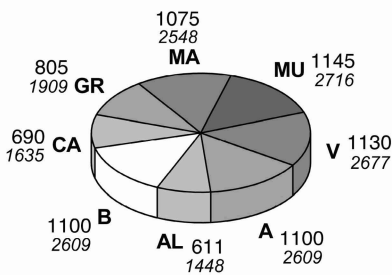
### ESCENARIOS DE IMPACTO SÍSMICO Y ESTIMACIONES DE PRONÓSTICO

Como lugares de estudio hemos elegido algunos núcleos urbanos importantes localizados en el sur-sureste de España, que, como es bien conocido, es una zona sísmica activa del país, además de la segunda y tercera ciudades más grandes localizadas en la costa levantina y más al norte.

**Magnitud 6.0, profundidad 10 km**



**Magnitud 6.5, profundidad 10 km**



**Personas fallecidas**  
**Personas heridas**

**Tasa de siniestralidad**  
(muertes / 10<sup>5</sup> habitantes)

**Pérdida económica**  
(millones de euros)

FIGURA 1. Personas muertas, individuos heridos, tasa de siniestralidad y pérdida económica en el caso de algunas ciudades españolas con diferente densidad de población. Las cifras representan estimaciones promedio y se refieren a dos modelos de terremoto: uno de magnitud  $M_s$  6,0 y otro de magnitud  $M_s$  6,5, ambos de profundidad focal 10 km. Nomenclatura: A, Alicante; AL, Almería; B, Barcelona; CA, Cádiz; GR, Granada; MA, Málaga; MU, Murcia; V, Valencia.

Puesto que los terremotos ibéricos son por lo general eventos de pequeña magnitud  $M_s$  muy poco profundos, ya que sus magnitudes son mayormente  $\leq 5,9$  y sus profundidades focales  $\leq 33$  km, a efectos de pronóstico hemos supuesto la ocurrencia de dos terremotos ibéricos de magnitudes  $M_s$  6,0 y 6,5 y profundidad 10 km, que es la profundidad focal que con más frecuencia aparece en el catálogo del National Earthquake Information Center (NEIC). La figura 1 muestra los resultados obtenidos para los escenarios urbanos investigados, agrupados por conceptos: personas fallecidas, heridas, tasa de siniestralidad y pérdida económica. Como el número de heridos es, para un valor de magnitud dado, directamente proporcional al número de víctimas mortales de acuerdo con la ecuación de predicción manejada, estas dos variables admiten una misma representación gráfica y así sus respectivas estimaciones se dan juntas. Los resultados son bastante elocuentes, pero para su correcta valoración no debe ignorarse que los problemas que conciernen a una elevada densidad de población se han resuelto considerando un único grupo de densidad de población, lo que introduce un sesgo de la información y conduce a una estimación mínima. Cualquier otro intento por obtener una mejor relación entre el número de individuos muertos o heridos y los niveles de población y desarrollo socioeconómico, requiere un trabajo adicional sobre la base de una

regresión semilogarítmica específica para el caso analizado, así como una partición más fina del territorio y densidades de población más detalladas.

**CONCLUSIONES**

La metodología desarrollada se ocupa de la interacción sismo-población y está orientada a la evaluación del número de víctimas humanas y del coste económico como consecuencia de un desastre sísmico antes de que el acontecimiento suceda. Lo cual supone una base de conocimiento más firme por cuanto se disponen de cifras y números que permiten la toma de decisiones con un menor nivel de incertidumbre, tanto por lo que respecta a planes y acciones de emergencia como en ingeniería sísmológica. Todo esto incide, sin duda, en muy diversos ámbitos que tienen distintas competencias y asumidas ciertas responsabilidades, en definitiva involucrados en la prevención del riesgo sísmico. La posibilidad de adelantar en esta materia valoraciones cuantitativas en previsión de un terremoto modelo, también es del interés de las compañías de seguros. Daños más específicos que pueden afectar a edificios y otras estructuras, no son considerados en este trabajo a causa de que su vulnerabilidad frente al fenómeno sísmico no es bien conocida. El esquema de trabajo aquí desarro-

llado con la ayuda de un sistema de información geográfica tiene la ventaja de que se puede extender fácilmente a otros casos considerando los datos sísmicos y económicos pertinentes y fuentes de información nacionales o internacionales de dominio público.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores MV y AG han recibido ayuda económica, el primero de la Diputación General de Aragón y del European Social Fund, PhD grant B037/2001, y el segundo del Ministerio de Educación, beca AP2002-1347.

### REFERENCIAS

- Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) (2000): *Gridded Population of the World (GPW)*, Version 2. CIESIN, Columbia University, Palisades, New York (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw>).
- Chen, Q.F., Chen, Y., Liu, J. y Chen, L. (1997): Quick and approximate estimation of earthquake loss based on macroscopic index of exposure and population distribution. *Natural Hazards*, 15: 217-229.
- Christoskov, L. y Samardjieva, E. (1984): An approach for estimation of the possible number of casualties during strong earthquakes. *Bulgarian Geophysical Journal*, X (4): 94-106.
- Instituto Nacional de Estadística (INE) (2003): Ministerio de la Presidencia del Gobierno, Madrid, España (<http://www.ine.es>).
- López-Casado, C., Molina, S., Delgado, J. y Peláez, J.A. (2000): Attenuation of intensity with epicentral distance in the Iberian Peninsula. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90: 34-47.
- Munich Reinsurance Group (MRG) (2000): *World Map of Natural Hazards* (CD-ROM), Munich, Germany.
- Penn State University Libraries' Digital Chart of the World Server (1992): <http://www.maproom.psu.edu/dcw>.
- Samardjieva, E., Payo, G. y Badal, J. (1999): Magnitude formulae and intensity-magnitude relations for early instrumental earthquakes in the Iberian region. *Natural Hazards*, 19: 189-204.
- Samardjieva, E. y Badal, J. (2002): Estimation of the expected number of casualties caused by strong earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92: 2310-2322.
- World Bank (2003): [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org).