DESARROLLO DE UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA PARA ESTUDIOS DE PELIGROSIDAD SISMICA EN LA ZONA DEL ESTRECHO.

María Esther Jiménez[1], Belén Benito[1] y Luis Cabañas[1].

1. E.U.I.T. Topográfica. Universidad Politécnica de Madrid.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para estudios de peligrosidad sísmica incorporando la técnica de los Sistemas de Información Geográfica, para el almacenamiento y relación de la información de diversa índole que interviene en los cálculos.

Una aplicación ha sido realizada en la región Sudoeste de Andalucía, incluyendo la zona del Estrecho y áreas circundantes. Dada la problemática de esta región, donde además de la sismicidad local ejercen una notable influencia los sismos ocurridos en la fractura de Azores-Gibraltar, los cálculos de peligrosidad se han realizado separando la contribución de sismos próximos y lejanos. El fin último es obtener espectros diferentes para ambos, teniendo en cuenta su diferente composición espectral y las implicaciones que esto tiene en el diseño sismorresistente de estructuras. Como resultado del trabajo se obtienen inicialmente mapas de peligrosidad en términos de intensidad macrosísmica, I , para periodos de retorno de 500 y 1000 años, cubriendo la zona de estudio. De éstos se deducen mapas de aceleración pico, A_{max} , por aplicación de distintas correlaciones I/A_{max} ; lo que permite analizar la variabilidad de valores dependiendo de la correlación empleada.

Por último se realiza una aplicación específica en un emplazamiento en San Fernando donde se calculan espectros de respuesta correspondientes a sismos locales y a sismos de Azores independientemente, ambos son comparados con los que establece la Norma Sismorresistente NCSE-94 para esta población.

INTRODUCCION

Actualmente los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) constituyen una herramienta esencial para aplicaciones que requieren almacenar y asociar distinta información referida a una misma zona, permitiendo relacionar los datos descriptivos –almacenados en una base de datos adecuadamente estructurada- con los correspondientes datos posicionales, englobados en ficheros gráficos. Facilitan así el análisis, gestión y explotación de los datos y permiten al mismo tiempo la integración de los resultados en el propio SIG, contribuyendo de esta manera a la obtención de una mayor resolución en la representación de los mismos.

Estas características cualifican a los SIG como sistemas muy útiles en estudios geofísicos, destinados a la estimación de riesgos naturales en los que sea necesario relacionar un gran volumen de datos de distinta procedencia, como es el caso de la peligrosidad y el riesgo sísmico.

En esta línea se enmarca el presente trabajo, que consiste en el desarrollo de un SIG para almacenar la información geofísica existente en la zona del estrecho, que será posteriormente relacionada con su correspondiente base cartográfica. Una primera aplicación del mismo es dirigida a estimaciones de la peligrosidad sísmica de la zona comprendida en el cuadrante:

[7° 00 W - 5° 00 W ; 36° 00 - 37° 50 N]

La peligrosidad se ha estimado en términos de intensidad y aceleración pico, para periodos de retorno de 500 y 1000 años, y considerando independientemente la acción de sismos próximos (locales) y lejanos (ocurridos en la fractura Azores-Gibraltar). Los distintos mapas generados son almacenados en el propio SIG y algunos ejemplos son presentados en el siguiente apartado.

Un estudio más detallado de la peligrosidad se ha llevado a cabo en San Fernando, donde se ha evaluado la contribución de distintas zonas sismogenéticas a la peligrosidad sísmica, llegando a estimar espectros asociados a sismos en distintos rangos de distancia. Estos espectros han sido comparados con el de la Norma Sismorresistente Española, con el fin de valorar la idoneidad del coeficiente K introducido en la misma para contemplar la acción de sismos lejanos. El trabajo finaliza con algunas conclusiones obtenidas al respecto.

2.- DESARROLLO DE UN SIG PARA CALCULO DE LA PELIGROSIDAD SISMICA.

En primer lugar se desarrolla un proyecto SIG para almacenar, gestionar y explotar la información tectónica, sísmica, geológica y topográfica del Sur de España, relacionando los datos posicionales con sus correspondientes datos descriptivos, almacenados en la base de datos asociada. Esta interrelación posibilita la realización de consultas, bien sean gráficas, analíticas o mixtas, combinando además distintas capas de información. Los resultados obtenidos pasan a formar parte del SIG, lo que supone la actualización del sistema de forma automática en tiempo real.

Es necesario realizar una primera explotación y análisis de los datos, de forma que éstos constituyan la entrada a los programas de cálculo asociados al sistema, y cuyos resultados a su vez se integran de nuevo en el proyecto. Estos datos, representativos de la peligrosidad y procedentes del entorno de cálculo, se representan con las distintas utilidades que proporciona el SIG; adoptando aquellas que más interesen a los propósitos del trabajo, como pueden ser mapas de isolíneas en términos de intensidad o aceleración pico.

Con objeto de sistematizar estas funciones se ha establecido una metodología de trabajo, mostrada en la Figura 1, que consta principalmente de tres fases que se detallan seguidamente. La metodología incluye la posibilidad de introducir el efecto local del suelo para obtener una caracterización más completa de la peligrosidad de la zona; aunque en la aplicación aquí desarrollada no ha sido utilizada.

- Zonificación Sismogenética
  En esta primera fase se trata de relacionar la información sísmica y tectónica que permite asociar los epicentros a las estructuras geológicas y definir a partir de ahí las zonas sismogenéticas. El sistema agiliza este proceso al permitir cambiar la geometría de las zonas de forma interactiva y obtener información gráfica y alfanumérica de cada una de ellas, con la correspondiente distribución temporal de sismos.
  Así se puede verificar la idoneidad de la zonificación adoptada y variarla hasta que resulte satisfactoria. Por otra parte, la posibilidad de superponer capas con diferente información facilita también esta tarea, ya que se pueden visualizar simultáneamente distintos aspectos determinantes del problema.
  En la Figura 2 se muestra la zonificación adoptada en superposición con las capas de información sísmica y tectónica.

- Cálculo de la Peligrosidad.
  Esta fase comienza con el cálculo de parámetros característicos de las zonas sismogenéticas definidas en la fase anterior, que constituyen parámetros de entrada al cálculo de la peligrosidad. Esto se realiza a su vez con los programas conectados al SIG, que proporcionan los valores de intensidad y/o aceleración pico asociados a diferentes probabilidades de excedencia.

- Cuantificacion del Efecto Local
  Aunque la cuantificación de este efecto es muy compleja y realizarlo en rigor requeriría estudios particulares de la geología y topografía de cada emplazamiento, se incluye en esta estructura general una opción, para estimar dicho efecto en primera aproximación.
  Dado que el SIG permite realizar operaciones de álgebra de capas, se pueden aplicar factores de amplificación a los valores de aceleración obtenidos en la fase previa, en función de los diferentes tipos de suelo, y obtener así valores pico que incluyen el efecto local. Esta estimación aproximada proporciona, fundamentalmente, una idea de la amplificación relativa que cabe esperar entre las diferentes zonas.

3.- ESTIMACION DE LA PELIGROSIDAD EN LA ZONA DE ESTUDIO

Los cálculos han sido efectuados inicialmente en términos de intensidad macrosísmica, y aprovechando la versatilidad que ofrece el SIG para operaciones de conversión de parámetros se ha estimado la aceleración pico, mediante la aplicación de distintas leyes de correlación. Entre las existentes en la literatura se han considerado como más idóneas para la zona de aplicación las de Ambraseys (1975), Margottini et al. (1992), Murphy O'Brien (1977) y Krinitzsky-Chang (1988). Estas correlaciones aparecen representadas en la Figura 3.

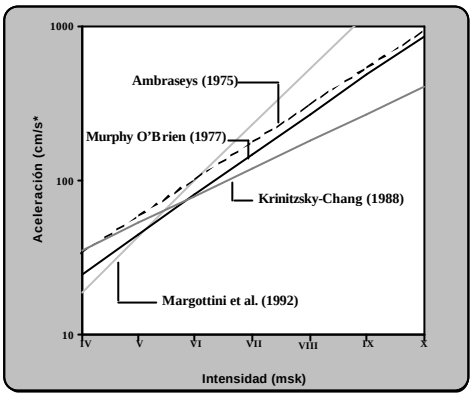

Figura 3.- Leyes de correlación I/A_{max}, propuestas por diferentes autores y empleadas en este estudio.

En esta primera aplicación se ha optado por emplear el mapa de zonas definidas para la (NCSE-94), a fin de facilitar la comparación de espectros con la que se concluye el trabajo. A partir de los parámetros descriptivos de la sismicidad de las zonas, se ha procedido al cálculo de la peligrosidad con el programa EQRISK, empleando las leyes de atenuación desarrolladas por Martín (1983). Los periodos de retorno considerados son de 500 y 1000 años y para ellos se han calculado los valores puntuales de intensidad en una malla de puntos cubriendo el cuadrante de estudio.

Uno de los principales objetivos de este trabajo ha sido separar la contribución de sismos próximos y lejanos en la peligrosidad, dado que ambos presentan contenidos espectrales bien diferentes, y la aplicación final del trabajo ha sido la estimación de espectros. Para ello, la peligrosidad se ha estimado por una parte considerando la contribución de todas las zonas sismogenéticas a excepción de Azores-Gibraltar, lo que supone estimar solamente la acción de la sismicidad local en cada punto. Por otra parte, se han realizado los cálculos considerando sólo la contribución de Azores, que refleja la influencia de sismos lejanos (más de 250 km). Los distintos mapas obtenidos se presentan a continuación.

3.1.- Mapas de Intensidad Macrosísmica

Los mapas resultantes del estudio, en términos de intensidad, para periodos de retorno de 500 y 1000 años se incluyen en la Figura 4. Los dos primeros mapas (4a, 4b) corresponden a intensidades esperadas debido a la ocurrencia de sismos locales mientras que los dos últimos (4c, 4d) representan intensidades asociadas sólo a los sismos de Azores. Esta diferenciación hace que estos mapas sean aplicables a diferentes tipos de estructuras, rígidas y flexibles respectivamente.

3.2.- Mapas de Aceleración Pico

A partir de los mapas anteriores y aplicando las correlaciones citadas se han obtenido un conjunto de mapas de aceleración pico, cuya utilidad puede depender de la aplicación requerida y del carácter más o menos conservador de la misma. Algunos ejemplos son mostrados en la Figura 5 y corresponden a los mapas deducidos con las correlaciones de Ambraseys (5a, 5b) y Krinitzsky-Chang (5c, 5d), que proporcionan valores extremos entre las cuatro correlaciones empleadas.

4.- ESPECTROS DE RESPUESTA EN SAN FERNANDO

Una aplicación más específica se ha llevado a cabo para un emplazamiento genérico en suelo duro o roca localizado en San Fernando, donde se han llegado a calcular espectros de respuesta representativos de la peligrosidad sísmica. Dichos espectros se han estimado independientemente para sismos próximos y lejanos, con una probabilidad uniforme para todo el rango de frecuencias (U.H.S., Uniform Hazard Spectrum). Estos han sido comparados con los de la Norma Sismorresistente Española, lo que ha permitido extraer una serie de conclusiones al respecto.
La metodología seguida para el cálculo de tales espectros ha sido desarrollada previamente por Benito y López Arroyo (1998) e incluye esencialmente los siguientes pasos:

- 1.- Cálculo de la peligrosidad, separando la contribución de las diferentes zonas sismogenéticas. Se obtienen así curvas de probabilidad procedentes de las zonas con mayor contribución.
- 2.- Determinación de escenarios de peligrosidad caracterizados por pares magnitud-distancia correspondientes a los terremotos asociados a las zonas de mayor contribución.
  Para ello, se parte de las curvas anteriores, y fijado un cierto periodo de retorno, se establecen las intensidades esperadas en el emplazamiento debido a la actividad de las zonas que más contribuyen. De estas intensidades se estima la magnitud. Por otra parte, haciendo la hipótesis de que el máximo terremoto de una zona ocurre en el límite más próximo al emplazamiento se tiene una estimación de la distancia Δ.
- 3.- Aplicación de modelos de aceleración espectral en función de la magnitud y la distancia $SA = f(M, \Delta)$, para diferentes frecuencias dentro del rango de interés en ingeniería sísmica (0.1-25 Hz). Estos son propiamente espectros de peligrosidad uniforme, ya que las ordenadas espectrales se han calculado para una misma probabilidad de excedencia, partiendo de la magnitud asociada a dicha probabilidad.

Los aspectos prácticos de la aplicación de esta metodología se comentan a continuación. En la Figura 6 se muestran las curvas de peligrosidad correspondientes a la actividad de las diferentes zonas sismogenéticas. Puede observarse que la mayor contribución la presenta la zona 8 (Azores-Gibraltar), seguida de las zonas 5 y 7, que corresponden al emplazamiento y a la zona contigua del Golfo de Cádiz, respectivamente.

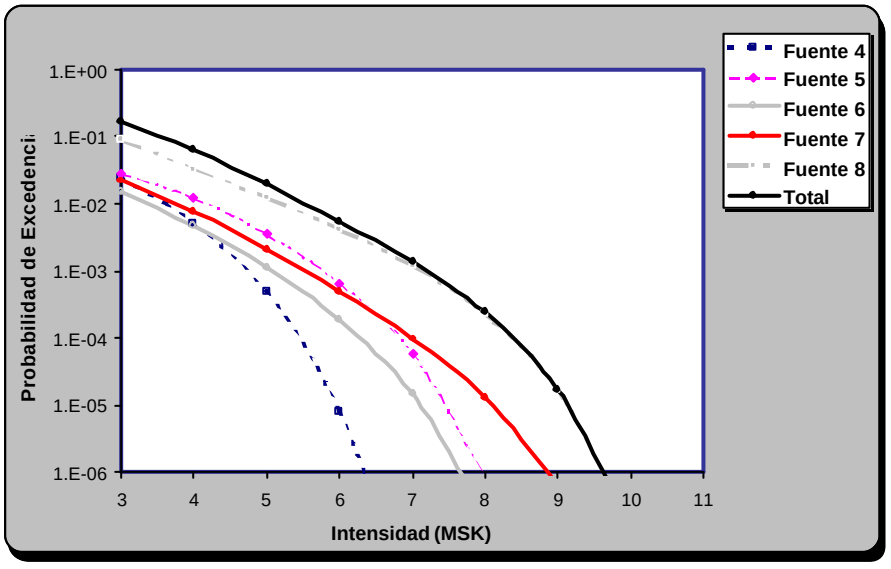

Figura 6.- Curvas de peligrosidad separando la contribución de las diferentes zonas.

De estas curvas se obtienen las intensidades en el emplazamiento para periodos de retorno de 500 y 1000 años y, a partir de ellas se estiman las magnitudes asociadas, en dos pasos:

- Aplicación de leyes de atenuación específicas para cada zona, con el fin de obtener la intensidad epicentral correspondiente a cada valor de intensidad sentida. Las leyes empleadas han sido las deducidas por Martín (1983) para el Sur de España y para Azores.
- Estimación de la magnitud asociada al valor de la intensidad epicentral obtenida en el paso previo, aplicando las correlaciones I_o/M deducidas por Martín (1983) y Benito (1993).

Se ha estimado asímismo la distancia hipocentral correspondiente a los sismos característicos de cada zona, considerando éstos situados en el límite más próximo al emplazamiento y con una profundidad aproximada de 10 Km, dado que la actividad de todas las zonas es superficial. Los valores obtenidos de intensidad, magnitud y distancia por el procedimiento descrito se incluyen en la siguiente tabla:

		Is		**Io**		**M** (A. Martin, 1983)		**M** (B. Benito, 1993)	
		T_{500}	T_{1000}	T_{500}	T_{1000}	T_{500}	T_{1000}	T_{500}	T_{1000}
SISMICIDAD CERCANA	ZONA 5 Rh=10 km	5	6	5	6	4.3	4.5	2.9	3.4
	ZONA 7 Rh=11km	5	6	5	6	4.1	4.4	2.5	3.1
SISMICIDAD LEJANA	ZONA 8 Rh=277 km	7	7	8	8	5.6	5.9	5.9	6.6

A partir de ellos se han construido los correspondientes espectros aplicando dos modelos de movimiento fuerte del suelo. El primero es el desarrollado por Benito (1993) a partir de datos de los terremotos italianos, y el segundo es el deducido por Ambraseys et al. (1996) con datos de terremotos europeos. Este último sólo cubre el rango de distancias 0-200 km por lo que no es aplicable para sismos lejanos y sólo ha sido empleado para estimar el espectro de sismos locales.
Las Figuras 7a y 7b recogen los espectros obtenidos con el modelo de Benito (1993) para las tres zonas de mayor contribución, junto con el espectro que establece la norma (NCSE-94) para un emplazamiento de suelo duro (C=1.0) en San Fernando (Coef. de contribución, K=1.4). Dichos espectros se han representado para periodos de retorno de 500 y 1000 años. Las Figuras 7c y 7d representan los espectros deducidos con el modelo de Ambraseys et al. (1996) sólo para sismos próximos, y estos son también comparados con el de la Norma Sismorresistente Española.

4.1 Discusión de los Resultados

En la Figura 7a puede observarse que, para periodos de retorno de 500 años, los espectros correspondientes a sismos locales presentan mayor amplitud que los sismos lejanos para periodos bajos, inferiores a 0.2s aproximadamente. Mientras que, para periodos mayores a 0.3s es claramente dominante el espectro de sismos lejanos. El espectro de la norma está por debajo de ambos y sólo resulta conservador para periodos mayores de 1s, hecho que cuestiona la idoneidad del coeficiente K introducido para contemplar la acción de sismos lejanos.
Para periodos de retorno de 1000 años el espectro de sismos de Azores (Figura 7b) es dominante sobre los de sismos próximos prácticamente para todo el rango de periodos, y sobre el de la norma para periodos inferiores a 2s. Puede afirmarse que la acción de los sismos de Azores-Gibraltar cobra mayor importancia para periodos de retorno mayores, hecho que puede explicarse por los largos periodos de recurrencia de estos sismos, unido a su elevada intensidad, superior a la de los sismos próximos.
Podría pensarse que los resultados encontrados dependen decisivamente de los modelos de movimiento fuerte empleados. Sin embargo, un resultado no muy diferente se observa en las Figuras 7c y 7d, donde aparecen los espectros calculados para sismos próximos con el modelo de Ambraseys et al. (1996), comparados también con los de la Norma Sismorresistente, aunque por las razones ya expuestas aquellos sólo han sido deducidos para sismos próximos. Puede comprobarse que en el rango de bajos periodos el espectro calculado excede al de la Norma, igual que sucedía con el modelo anterior.

5.- CONCLUSIONES

Del estudio realizado pueden extraerse una serie de conclusiones referentes tanto al uso de un SIG para el cálculo de la peligrosidad, como a los resultados obtenidos, reflejados en los mapas y en los espectros de respuesta estimados.

- Referentes al uso de los Sistemas de Información Geográfica:

- Los SIG resultan una herramienta muy adecuada para almacenamiento de las diferentes capas de información necesarias para el cálculo de la peligrosidad, facilitando a su vez su interrelación.
- Facilitan la integración y homogeneidad de datos de distintos formatos, escalas y sistemas de proyección, permitiendo a su vez la representación de forma uniforme.
- Permiten controlar información de diversa índole de una zona, incorporando los resultados que vayan obteniéndose al propio sistema.

- Referentes a los mapas y espectros de respuesta resultantes.

- Los mapas de aceleraciones muestran una gran variabilidad dependiendo de la correlación elegida. Los valores más bajos de obtienen con la correlación de Krinitzsky-Chang (1988) y los más altos con la de Ambraseys (1975).
- Por el método desarrollado se han calculado espectros de sismos próximos y lejanos independientemente, para periodos de retorno de 500 y 1000 años, cada uno de ellos con probabilidad uniforme de excedencia. Los resultados ponen de manifiesto que para periodos inferiores a 0.2s los espectros de sismos próximos son dominantes, mientras que para periodos superiores a 0.3s dominan los de sismos lejanos. El espectro de la Norma Sismorresistente Española resulta más bajo que los otros dos para periodos inferiores a 1s.
  Las diferencias son aún más marcadas para periodos de retorno de 1000 años, para los que los sismos lejanos son claramente dominantes en el rango [0 – 2s], lo que puede explicarse por la elevada intensidad de estos sismos unido a sus largos periodos de recurrencia.

6.- REFERENCIAS

Ambraseys, N.N., 1975. *The Correlation of Intensity with ground motion*. Proc. 14th Assem. ESC.

Ambraseys, N.N.; Simpson, K.A. y Bommer, J.J., 1996. *Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe*. E.E.S.D., Vol 25, pp 375-400.

Benito, B.,(1993). *Estimación de Parámetros Sísmicos y Espectros de Respuesta Característicos del Movimiento del Suelo en Emplazamientos de la Península Ibérica*. Tesis Doctoral. F.F.C.C. Universidad Complutense de Madrid.

Benito, B y López Arroyo, A., 1998. *Contribution of Near and Distant Earthquakes to Seismic Hazard of Southern Spain*. (En prensa)

Krinitzsky, E.L. y Chang, F.K., 1988. *Intensity-Related Earthquake Ground Motions*. Bull. Ass. Eng. Geo., Vol 4, pp 425-435.

Margottini, C.; Molin, D. y Serva, L., 1992. *Intensity Versus Ground Motion: A New Approach Using Italian Data*. Eng. Geo., Vol 33, pp 45-58.

Martin, A.J., 1984. *Riesgo Sísmico en la Península Ibérica*. T I-II. Tesis Doctoral. I.G.N. Madrid

Murphy, J.R. y O'Brien, L.J., 1977. *The Correlation of Peak Ground Acceleration Amplitude with Intensity and other Phisical Parameters*. B.S.S.A.., Vol 67, pp 877-915.

A.E.I.S. *25 años de Normativa Sismorresistente en España (1969-1994).*

AGRADECIMIENTOS

Al IGN por proporcionarnos los datos necesarios para desarrollar este trabajo, en particular a G. Pascual y a J.M. Martínez Solares.

Al CSN y ENRESA como entidades financiadoras del Proyecto Daños, dentro del cuál se enmarca este trabajo.