

## ZONACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE BARCELONA

J. Cid<sup>(1)</sup>, S. Figueras<sup>(2)</sup>, J. Fleta<sup>(2)</sup>, X. Goula<sup>(2)</sup>, T. Susagna<sup>(2)</sup>, C. Amieiro<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>*Direcció de Serveis de Protecció Civil. Ajuntament de Barcelona, jcid@mail.bcn.es*

<sup>(2)</sup>*Institut Cartogràfic de Catalunya*

### RESUMEN

La ciudad de Barcelona desde 1995 está siendo objeto de diferentes estudios para la evaluación de su riesgo sísmico, en los que participan diversas entidades investigadoras; en concreto se presenta la zonación sísmica de la ciudad basada en la respuesta sísmica del suelo. La principal parte de la ciudad está construida sobre una cobertera Cuaternaria que descansa sobre un basamento Paleozoico o Terciario dependiendo del sector, y que puede provocar posibles amplificaciones sísmicas. La respuesta sísmica del subsuelo de la ciudad de Barcelona ha sido simulada numéricamente en 70 puntos, utilizando el método unidimensional lineal-equivalente Shake'91. Se ha integrado un proceso de Montecarlo con el objetivo de analizar las incertidumbres asociadas. En la zonación sísmica que se presenta se clasifica tres zonas en función, a grandes rasgos, del tipo de afloramiento Pleistoceno u Holoceno y tipo de basamento Paleozoico o Terciario.

**Palabras clave:** microzonación, efectos locales, simulación numérica.

### ABSTRACT

The city of Barcelona from 1995 is being object of several studies for the evaluation of their seismic risk, participating diverse investigating institutions; in particular we present the seismic zonation of the city based on the seismic response of the soil. The principal parts of the city are built on a Quaternary covert that yields on a Paleozoic or Tertiary basement depending on the sector, and that could produce possible seismic amplifications. The seismic response of the subsoil of the city of Barcelona has been simulated numerically in 70 points, using Shake'91, a one-dimensional lineal-equivalent method. A process of Montecarlo has been integrated with the objective to analyse the associated uncertainties. In the proposed seismic zonation of the city of Barcelona three zones are classified taking into account the kind of Pleistocen or Holocen outcrop and the kind of Paleozoic or Tertiary basement.

**Key words:** microzonation, local effects, numerical simulation.

### Introducción

La zona del NE de la Península Ibérica, dónde se sitúa la ciudad de Barcelona, es considerada de actividad sísmica moderada y catalogada con una intensidad VI MSK para un período de retorno de 500 años por la Norma Sísmica Española (NCSE-94,1995). Recientes estudios (Secanell, 1999; Goula et al., 1998) evalúan esta intensidad como VI-VII MSK para materiales terciarios aflorantes en la ciudad. La presencia de una cobertera Cuaternaria (Pleistocena-Holocena), sobre la cual se cimientan prácticamente la totalidad de las viviendas de la ciudad, puede producir un aumento considerable del movimiento del suelo haciendo necesaria la evaluación de esta posible amplificación, debido a la alta densidad de población y al alto índice de vulnerabilidad de las construcciones.

En este estudio se presenta como resultado final la zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales, así como resultados parciales que fundamentan esta zonación.

### Situación geológica

La ciudad de Barcelona (figura 1) se sitúa sobre la llanura del pedimento de la Sierra de Collserola que pertenece a la Cordillera Litoral Catalana, de dirección aproximadamente paralela a la línea de costa, y está limitada al NE por el delta del río Besòs y al SW por el del Llobregat. Podemos distinguir dos unidades geomorfológicas: los relieves montañosos que constituyen el substrato de la ciudad, en los que encontramos materiales Paleozoicos (metamórficos y graníticos) y Terciarios (Montjuïc); y el llano de Barcelona, dividido a su vez en otras dos unidades geomorfológicas: la zona central de la ciudad compuesta de materiales de edad Pleistocena, y los depósitos deltaicos de los ríos Besòs y Llobregat, compuestos por materiales recientes de edad Holocena.

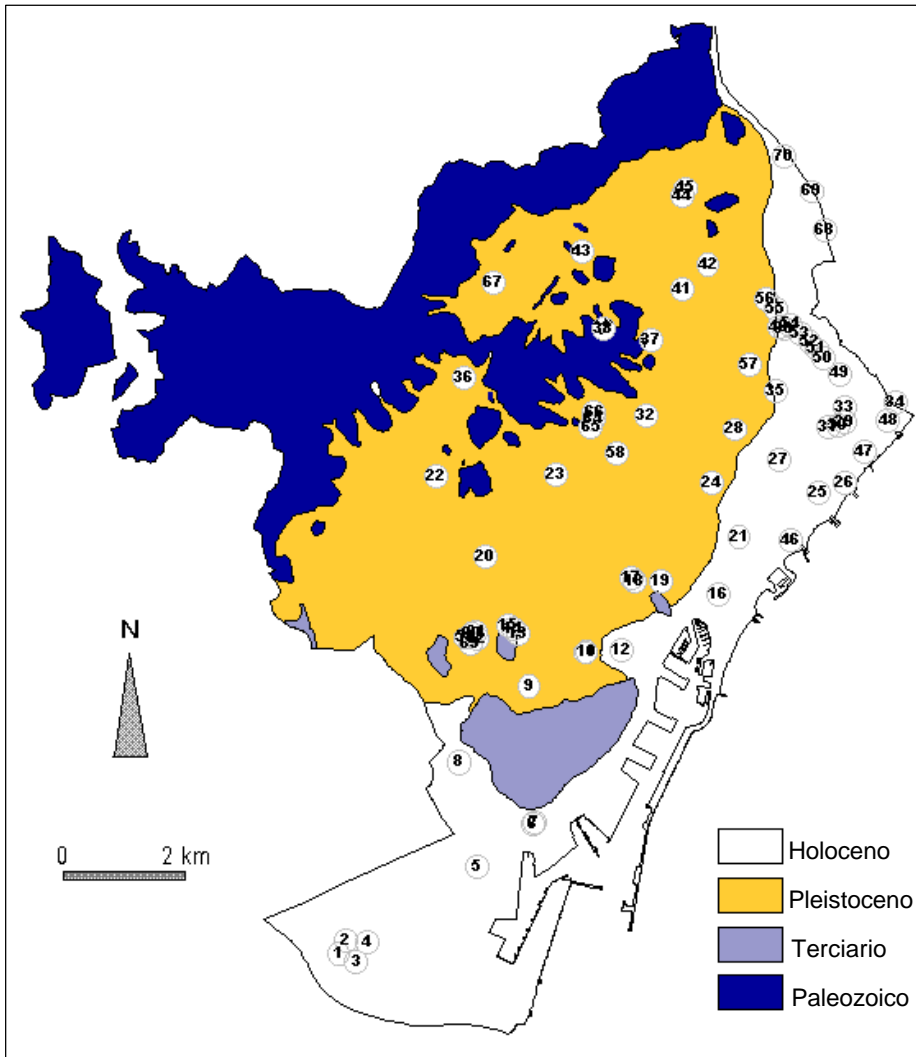


Figura 1. Situación geológica de la ciudad de Barcelona (basado en Losan, 1978). En ella se representa la localización de las 70 columnas representativas estudiadas.

## Estimación de los parámetros dinámicos de los suelos

Diferentes parámetros dinámicos de los suelos son necesarios para la simulación numérica de los efectos que éstos producen en la propagación de las ondas sísmicas. Parámetros como la velocidad de las ondas de cizalla ( $V_s$ ), módulo de cizalla dinámico máximo ( $G_{max}$ ), densidad ( $\rho$ ) y espesor de las capas. Una metodología que permite estimar los parámetros dinámicos de los suelos a partir de parámetros geotécnicos, usuales en la obra pública, fue definida (Cid, 1996), solucionando así el problema de la ausencia de valores experimentales de las propiedades dinámicas de los suelos para Barcelona. Estimamos, del ensayo de penetración estándar (SPT) u otros ensayos de penetración, una columna de suelo con un valor N homogéneo para cada capa, con un sentido representativo, estimativo y estocástico de cada emplazamiento. En total se han analizado 184 sondeos geotécnicos con un resultado de 70 columnas representativas (ver figura 1).

Este valor N es correlacionado empíricamente con la velocidad de las ondas de cizalla de cada capa mediante una serie de correlaciones empíricas publicadas y otras realizadas a partir de datos experimentales de la ciudad de Salónica (Pitilakis, com. pers.). Para la obtención de la velocidad de las distintas capas de cada columna se han tenido en cuenta los valores N medidos, más variaciones que indican la incertidumbre de la energía efectiva utilizada en el ensayo de penetración. Para ello se han usado todas las correlaciones disponibles y se ha seguido el proceso siguiente:

1. Disminución del valor N del ensayo de penetración estándar en un 10, 25 y 40%.
2. Aplicación de la totalidad de las correlaciones empíricas, para cada uno de los valores N y cada una de las 3 correcciones realizadas en el paso previo (obteniendo el valor promedio de  $V_s$  y su desviación estándar para cada capa).
3. En el caso de que el valor N sea superior a 50, este tipo de correlaciones empíricas no se aplican. El valor de  $V_s$  es estimado entonces en función de su litología, edad, profundidad, etc.
4. Incremento en un 25% de la  $V_s$  en materiales pleistocenos. Dado que la gran parte de las correlaciones mostradas han sido halladas en materiales holocenos, y parece admitido que la  $V_s$  puede variar del orden del 30% (Lo Presti y Lai, 1989).

De este modo hemos estimado los parámetros dinámicos de los materiales más superficiales para las 70 columnas representativas, en base a la información geotécnica disponible. En la figura 2 se pueden observar los resultados obtenidos, clasificados en afloramientos holocenos y pleistocenos, estos últimos de velocidad superior.

En general la información geotécnica no es disponible para profundidades mayores de 20 metros. Aunque en la zona alta de la ciudad encontramos el basamento Paleozoico a profundidades menores de 20 metros, es suficiente la información geotécnica para definir un modelo de capas planas unidimensional. Sin embargo a medida que nos acercamos hacia la línea de costa, con un aumento del espesor de materiales Terciarios, la base del Terciario no es accesible a los estudios geotécnicos debido a su gran profundidad. Es por ello que hemos recurrido a unos resultados preliminares de estudios de inversión de prospección gravimétrica detallada, que permiten estimar de una forma preliminar la profundidad del techo Paleozoico (Lázaro et al., 1998). La estimación del techo Terciario está basada en información geotécnica y extrapolaciones geológicas fundamentadas básicamente en el mapa geotécnico de la ciudad de Barcelona (Losan, 1978).

Una vez definido el espesor de las capas hasta el basamento Paleozoico, es

necesario definir los parámetros dinámicos en el resto de la columna donde no hay sondeo geotécnico, los parámetros dinámicos han sido estimados en base a diversos factores como profundidad, litología, grado de alteración y estudios previos (Barchiesi et al., 1997; Figueras et al., 1995; Losan, 1978). De forma esquemática en la ciudad encontramos, de abajo a arriba: materiales paleozoicos de velocidad de cizalla 2000 m/s, con una profundidad máxima en algunos puntos superior a los 300 m; materiales terciarios de velocidad de cizalla de 1200 m/s, ausentes en la parte alta de la ciudad y aumentando su potencia hacia la línea de costa, llegando a 300 m en algunos puntos; materiales cuaternarios, que pueden ser holocenos con un espesor máximo de 70 m localizado en los materiales deltaicos del Llobregat, o pleistocenos de velocidad de cizalla inferior a 400 m/s (y superior a la de los holocenos), localizados en la zona centro-alta de la ciudad con un espesor inferior a 20 m.

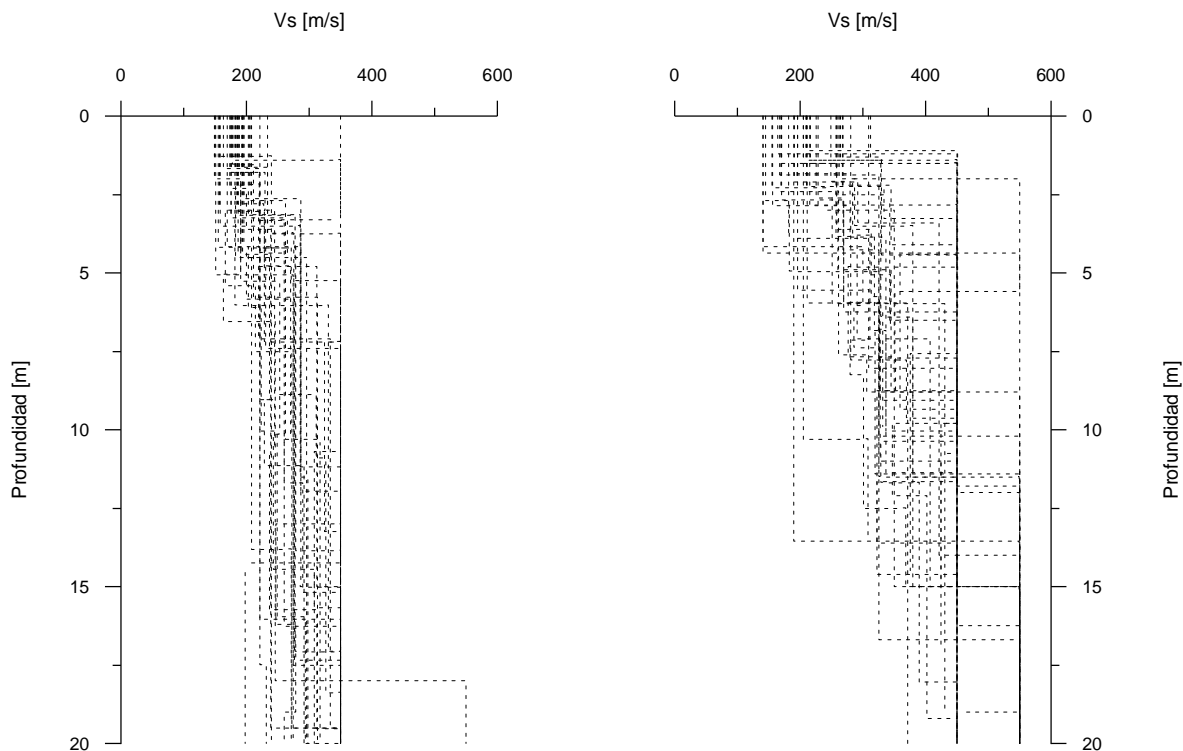


Figura 2. Variación de la velocidad de propagación de las ondas de cizalla en profundidad, para los metros más superficiales de las 70 columnas representativas analizadas (izquierda, afloramientos holocenos; derecha, afloramientos pleistocenos).

### Señales de entrada acorde al nivel de peligrosidad sísmica

Para la simulación numérica de los efectos sísmicos locales en los diferentes puntos en estudio, requerimos la selección de un movimiento de entrada. Estos movimientos de entrada han sido definidos como una serie de pulsos de Ricker de frecuencias predominantes 2, 3, 4, 5, 6 y 7 Hz, en base al parecido de su contenido frecuencial con los espectros usualmente propuestos en las normativas sísmicas. El nivel máximo de aceleración de estas señales se ha definido en base a los recientes estudios de peligrosidad sísmica realizados por el *Institut Cartogràfic de Catalunya* (Secanell, 1999; Goula et al., 1998), que obtienen como resultado una intensidad VI-VII MSK para un período de retorno de 500 años en los materiales terciarios de la ciudad de Barcelona, correspondiéndole un pico máximo de aceleración de 0.054 g, según la relación propuesta en la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-94, 1995).

En la figura 3 se puede observar el pulso de Ricker correspondiente a 3 Hz, su transformada de Fourier y su pseudoespectro de respuesta elástico en aceleración para un amortiguamiento del 5%.

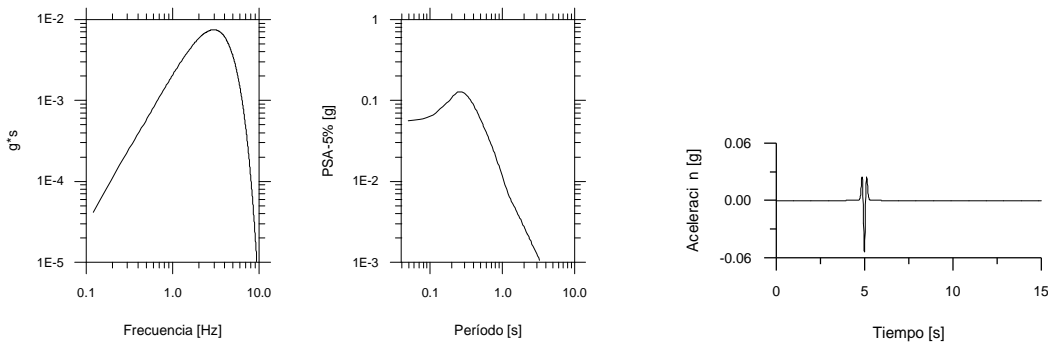


Figura 3. Pulso de Ricker de 3 Hz junto con el espectro de Fourier y el pseudoespectro de respuesta elástico en aceleración para un amortiguamiento del 5%.

### Simulación numérica de efectos sísmicos locales

Una vez definidos los modelos dinámicos unidimensionales del subsuelo de los diferentes puntos en estudio, así como definido el nivel de deformación de cizalla a la que será sometido el subsuelo a partir de una serie de pulsos de Ricker, se ha seleccionado el método lineal-equivalente Shake'91 (Idriss y Sun, 1992), debido a su nivel de estandarización y las condiciones locales de la zona de estudio. Las curvas de variación para diferentes tipos de materiales del módulo de cizalla dinámico ( $G$ ) normalizado al módulo de cizalla dinámico máximo ( $G_{max}$ ) y de la razón de amortiguamiento ( $D$ ) respecto la deformación de cizalla que serán utilizadas en el cálculo, están basadas en los datos experimentales del valle de Volvi (Cid, 1998).

Para analizar el grado de incertidumbre en los resultados ha sido utilizado un proceso de Montecarlo (500 cálculos), se han utilizado para las capas superficiales las distribuciones de velocidad descritas anteriormente y variaciones del 10% para las velocidades más profundas. Se toma una variación de  $0.2 \text{ g/cm}^3$  para la densidad de cada capa y se admite igualmente una variación del valor del espesor de las capas mas profundas del 15%.

Dado que las señales de entrada han sido definidas en materiales terciarios aflorantes, debemos deconvolucionar estas señales al basamento Paleozoico (considerado aflorante). El modelo dinámico utilizado para realizar esta deconvolución utilizando la simulación de Montecarlo y Shake'91 puede ser observado en la tabla 1.

Tipo	Espesor medio [m]	$s$ [m]	Densidad media [ $\text{g/cm}^3$ ]	$\rho$ [ $\text{g/cm}^3$ ]	$V_s$ media [m/s]	$s$ [m/s]
Roca alterada	10	4	2.3	0.2	550	55
Roca	90	13.5	2.4	0.2	900	90
Roca	75	11.25	2.6	0.2	1200	120
Roca	75		2.6	0.2	2000	200

Tabla 1. Parámetros dinámicos del emplazamiento de referencia para la ciudad de Barcelona, valores medios con su desviación estándar para ser tratados como variables aleatorias gaussianas.

Las señales deconvolucionadas han sido introducidas en la base de cada columna (basamento rocoso Paleozoico), procediendo a la simulación del movimiento del suelo en superficie, con los cálculos siguientes:

1. Acelerograma en superficie.
2. Función de transferencia entre la superficie y el basamento (considerado aflorante).
3. Pseudoespectro de respuesta elástico en aceleración para un amortiguamiento del 5%.
4. Pseudoespectro de respuesta elástico en aceleración para un amortiguamiento del 5% normalizado al pico de aceleración en superficie.
5. Pseudoespectro de respuesta elástico en velocidad para un amortiguamiento del 5%.

Cada una de estas funciones es evaluada para cada una de las 6 señales de entrada en cada uno de los 70 puntos de estudio y para 500 cálculos; empleando la simulación de Montecarlo.

### Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona

Cada una de las funciones simuladas ha podido ser clasificada en tres grupos diferentes. Como ejemplo en la figura 4 se presentan las funciones de transferencia clasificadas en tres zonas (promedio de las obtenidas para cada una de las señales de entrada consideradas), y comparadas con los resultados obtenidos de forma determinista (valores medios); en ella también podemos observar los pseudoespectros de respuesta elásticos en aceleración para un 5% de amortiguamiento (promedios), así como su correspondiente comparación con los resultados obtenidos de forma determinista para cada zona.

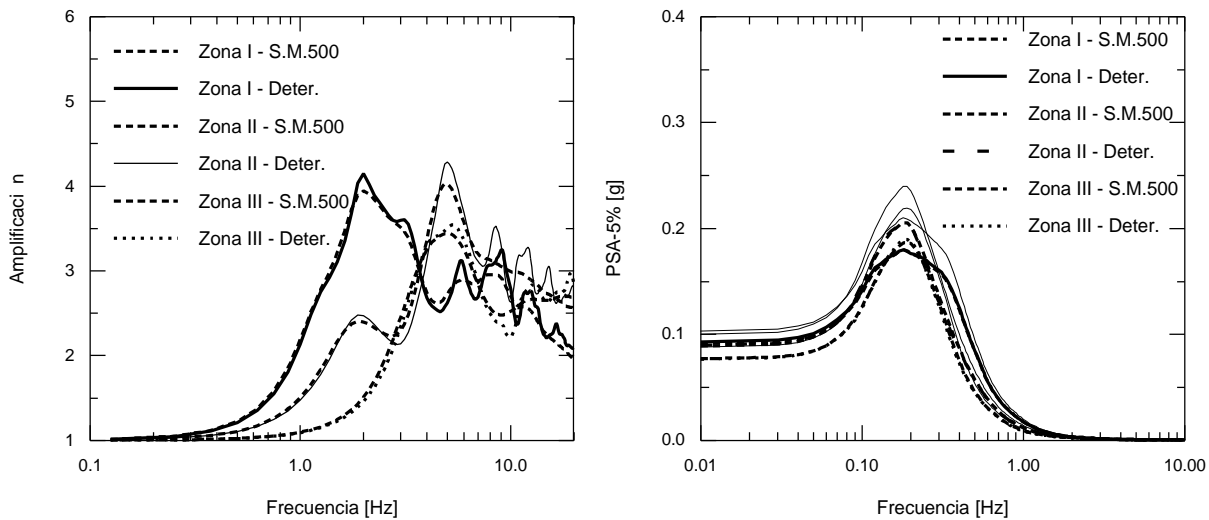


Figura 4. Funciones de transferencia promedio obtenidas para cada una de las zonas (superficie-basamento rocoso Paleozoico (considerado aflorante), y pseudoespectros de respuesta elásticos en aceleración para un 5% de amortiguamiento promedio en cada una de las zonas; ambos parámetros obtenidos aplicando simulación de Montecarlo (500 cálculos) y comparados con el resultado determinista (valores medios).

Dado que las señales de entrada consideradas estaban referenciadas en materiales terciarios aflorantes, hemos calculado la relación espectral relativa (*relative spectral ratio* -RSR) de cada una de las zonas definidas, entendidas como la función de

transferencia entre la zona dada aflorante y material terciario aflorante (emplazamiento de referencia). En la figura 5 podemos observar cada una de estas funciones de transferencia, así como la función de transferencia del emplazamiento de referencia.

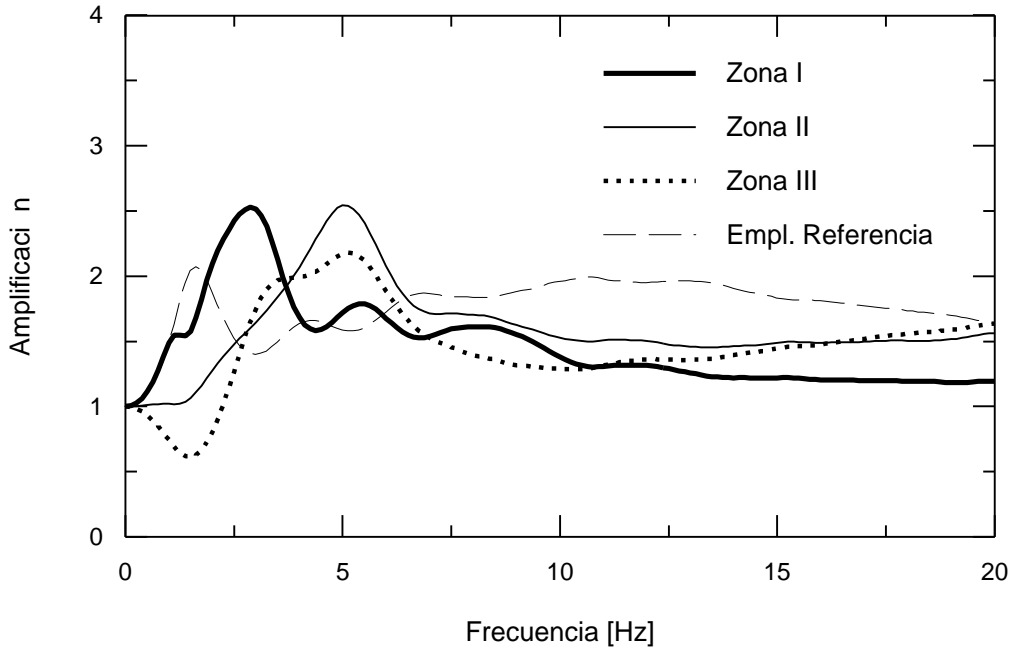


Figura 5. Funciones de transferencia (R.S.R.) promedio de cada una de las zonas definidas y función de transferencia del emplazamiento de referencia, aplicando en ambas un proceso de Montecarlo.

De esta forma, cada una de las zonas definidas posee las siguientes características:

- ♦Zona I, afloramientos holocenos. La función de transferencia presenta un pico de amplificación máxima próximo a 2.5 Hz, con un valor de amplificación en torno a 2.5.
- ♦Zona II, afloramientos pleistocenos con substrato Terciario de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta. La función de transferencia presenta un pico de amplificación máxima próximo a 5 Hz, con un valor de amplificación en torno a 2.5.
- ♦Zona III, afloramientos pleistocenos sin substrato Terciario de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta. La función de transferencia presenta un pico de amplificación máxima próximo a 5 Hz, con un valor de amplificación en torno a 2.25, y una desamplificación de las bajas frecuencias.

De la consideración de estas tres zonas definidas y la zona que quedaría definida por los afloramientos rocosos (Zona 0) obtenemos la zonación sísmica de la ciudad de Barcelona que se presenta en la figura 6. El incremento del nivel de aceleración máxima respecto al emplazamiento de referencia es: Zona 0, 1; Zona I, 1.69; Zona II, 1.65; y Zona III, 1.43.

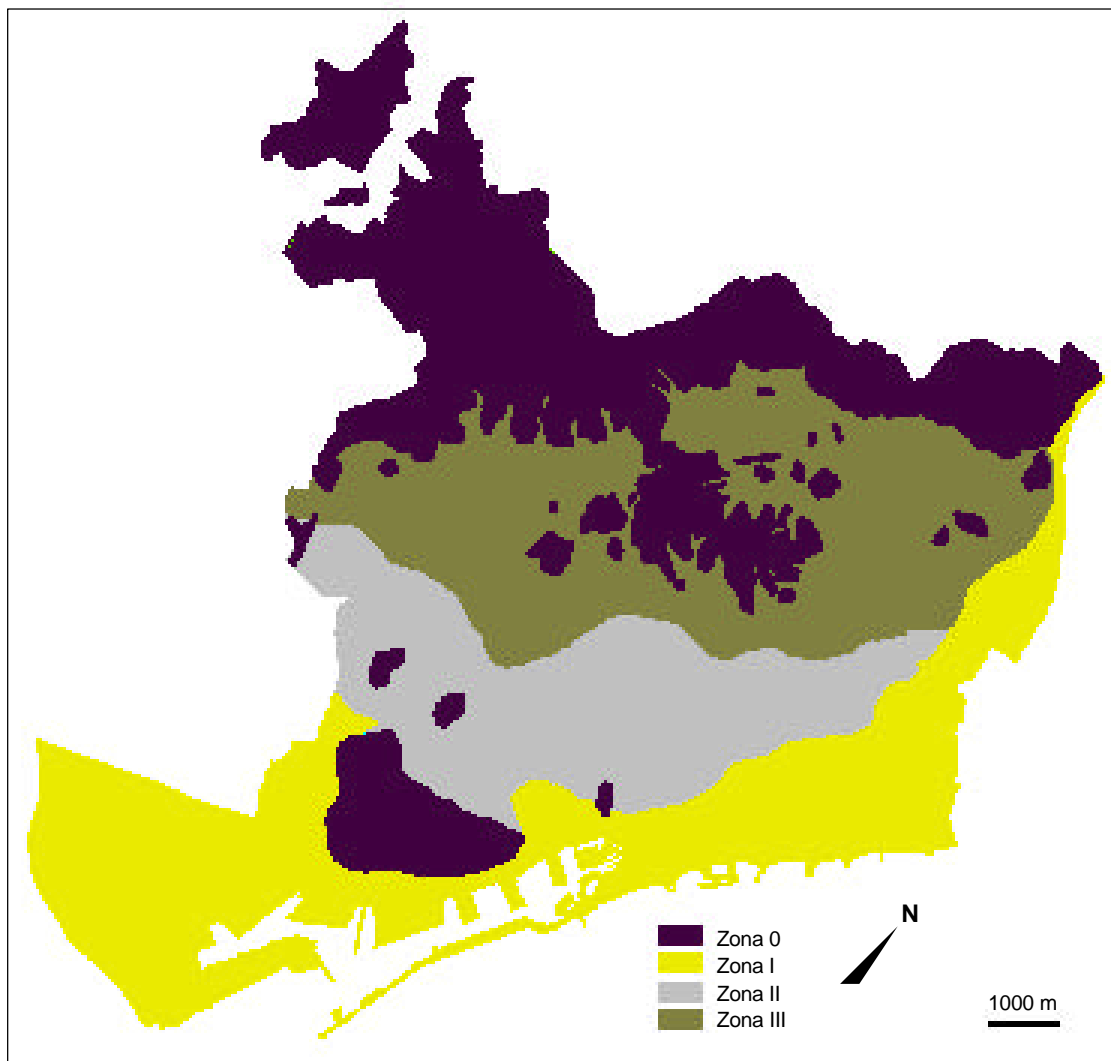


Figura 6. Figura 11. Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. Las funciones de transferencia (R.S.R.) de cada zona están caracterizadas por: Zona 0, plana; Zona I, primer pico de amplificación en torno a 2.5 Hz, que coincide con la máxima amplificación en torno a 2.5; Zona II, primer pico de amplificación en torno a 5 Hz, que coincide con la máxima amplificación en torno a 2.5; Zona III, primer pico de amplificación en torno a 5 Hz, que coincide con la máxima amplificación en torno a 2.25, con una desamplificación de las bajas frecuencias (basado en Cid, 1998).

## Conclusiones

Se ha considerado la peligrosidad sísmica de la ciudad de Barcelona con una intensidad VI-VII (MSK) para un período de retorno de 500 años en materiales terciarios aflorantes, definiendo de esta forma el emplazamiento de referencia. Con la utilización de una serie de pulsos de Ricker en base a este nivel de peligrosidad se ha realizado la simulación numérica de efectos locales, considerando un proceso de Montecarlo en la simulación numérica que nos ha permitido analizar la influencia del grado de incertidumbre de los parámetros dinámicos del suelo. Los resultados permiten observar un suavizado de las funciones de transferencia calculadas en base a los valores medios, aumentando el suavizado en las altas frecuencias, obteniendo una dispersión aproximada del 20% respecto al valor de amplificación media; no se observan variaciones importantes en los valores de la aceleración máxima del suelo (PGA).

Las diferencias observadas en las funciones de transferencia y espectros de respuesta calculados en los 70 puntos de estudio permiten distinguir cuatro zonas. Se ha



puesto de manifiesto que los materiales cuaternarios de la ciudad de Barcelona amplifican los efectos sísmicos y que la mayor amplificación aparece en la zona central y litoral de la ciudad.

## Referencias

- Barchiesi, A.M., Cid, J., Figueras, S., Susagna, T., Fleta, J. y Goula, X., (1997). "Influence of the geotechnical parameters on seismic local effects in Barcelona". *Proceedings of IAMG'97*. Vol 2: 922-927. Barcelona: CIMNE
- Cid, J., (1996). "Estimació dels paràmetres dinàmics dels sòls, procediment i aplicació a Barcelona". *Tesis de Master. Universitat Politècnica de Catalunya*, p. 227.
- Cid, J., (1998). "Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales". *Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya*, p. 215.
- Figueras, S., Schmidt, V., Susagna, T., Fleta, J., Goula, X. y Roca, A., (1995). "Preliminary Study of Microzonation of Barcelona". *Proceedings of the fifth International Conference on Seismic Zonation*. Vol. 1, p. 731-738.
- Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Secanell, R., (1998). "Informació territorial i anàlisi del risc pel pla SISMICAT. Part I: Perillositat Sísmica". *Report Institut Cartogràfic de Catalunya. No. GS165/98*.
- Idriss, I. M. & Sun J. I., (1992). "Shake'91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits". *User's Guide. University of California*, p. 13.
- Lázaro, R., Vilas, M., Rivero, L., Pinto, V., Bagán, L. y Casas, A., (1998). "Determinación de las isobatas del zócalo de la ciudad de Barcelona a partir de la interpretación de las anomalías gravimétricas". *I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. IX Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica*. (In press.).
- Lo Presti, D.C.F. y Lai, C. (1989). "Shear wave velocity from penetration tests". *Politecnico di Torino. Dipartimento di Ingegneria Strutturale. Atti del dipartimento*. Vol. 21, p. 32.
- Losan, (1978). "Mapa geotécnico de Barcelona, Badalona, Esplugues, L'Hospitalet, Sant Adrià y Sta. Coloma". Barcelona, 32, 1 map.
- NCSE-94, 1995. Normativa de Construcción Sismorresistente Española NCSE-94. *Real Decreto 2543/94. B.O.E. 33. The 8<sup>th</sup> of February 1995*.
- Secanell, (1999). "Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: Anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics". *Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona*. (en preparació.).