

Zonación Sísmica a Diferentes Escalas. Microzonación

Antoni ROCA, Xavier GOULA y Teresa SUSAGNA

Institut Cartogràfic de Catalunya. Parc de Montjuïc, s/n. 08038 Barcelona

RESUMEN

La *zonación* sísmica a escala regional y local (*microzonación*) constituyen una herramienta básica en la mitigación de los daños potenciales de los terremotos. La *zonación* sísmica se refiere generalmente al resultado de los estudios de peligrosidad, aunque, en un sentido más amplio puede también incluir aproximaciones regionales a la evaluación de efectos locales y vulnerabilidad desde un punto de vista estadístico. En zonas urbanas es preciso un cambio de escala y analizar en detalle el papel de la geología superficial en las posibles amplificaciones del movimiento del suelo. El resultado es una *microzonación* del territorio considerado, en el cual se evalúa también la vulnerabilidad de las edificaciones. En este artículo se discuten diferentes aspectos de estas técnicas, mostrando ejemplos de diversos trabajos realizados en Cataluña y en la ciudad de Barcelona.

ABSTRACT

Seismic *zonation* at regional scale and also *microzonation* (at local scale) are basic tools for earthquake damage mitigation. The concept of seismic *zonation* usually refers to the results of earthquake hazard assessment but, in a more general sense, it can also include regional approaches for the statistical evaluation of local effects and vulnerability. In urban areas a scale change is needed to analyse in detail the effect of the shallow geological levels in the

possible earthquake ground motion amplifications. The result is a *microzonation* of the considered territory that can also include building vulnerability assessment. In this paper various aspects of these techniques are discussed and illustrated with examples taken from studies carried out for Catalonia and the town of Barcelona.

1. INTRODUCCIÓN

La mitigación de los efectos de los terremotos puede lograrse mediante la aplicación de planes de prevención que incidan sobre distintos ámbitos de actuación: la planificación territorial (urbanismo), las medidas de construcción sísmo-resistente (edificación) y la preparación de procedimientos de emergencia (protección civil). Para actuar en cada uno de estos tres ámbitos de manera adecuada es preciso tener definidos el nivel sísmico y el nivel de riesgo de cada porción del territorio, es decir, tener definida una clasificación sísmica, una *zonación*.

La expresión final de esta *zonación* depende de su ámbito de aplicación. Así, para una normativa de construcción sísmo-resistente la clasificación de zonas deberá hacerse en función de la peligrosidad sísmica, expresada en algún o algunos parámetros característicos del movimiento “esperable” del suelo, como por ejemplo intensidad macrosísmica, aceleración o espectro de respuesta.

Casi todos los terremotos destructivos recientes han mostrado la importancia de la amplificación del movimiento sísmico debido a efectos locales en la distribución de los daños. El caso más dramático quizás fue el ocurrido el 19 de setiembre de 1985 en ciudad de Méjico debido al terremoto ocurrido a 300 km en la zona de Guerrero en la costa del Pacífico; las ondas de largo período fueron muy amplificadas por los sedimentos lacustres de gran espesor sobre los que se asienta gran parte de la ciudad. Con posterioridad, amplificaciones importantes ocurrieron en el área de la Bahía de S.Francisco debidas al sismo de Loma Prieta de 1989 o en los casos más recientes en las ciudades de Los Angeles con el sismo de Northridge de 1994 o en la ciudad de Kobe en 1995, en los que aparte de tener importancia otros efectos debidos a la ruptura, amplias amplificaciones pudieron observarse en los registros y en los daños.

Estos efectos del suelo, al introducirse en la zonificación de la peligrosidad sísmica, pueden considerarse a escala regional, desde un punto de vista estadístico. No obstante, su representación natural es la escala local. En los últimos años se ha visto el gran interés de la clasificación de los territorios, sobre todo zonas urbanas, a escala local, según los tipos de suelo. El resultado de estos estudios es lo que se denomina frecuentemente *microzonación* sísmica.

Este mismo término microzonación puede entenderse también en un sentido más amplio: en la preparación de planes de emergencia y también en aplicaciones dentro del campo de la prevención se requiere evaluar a priori los daños que pueden producirse por terremotos, lo que se denomina frecuentemente generar *escenarios de daños*. Para ello es preciso llevar a cabo una *microzonación* de la zona de estudio que incluya no sólo la evaluación de los efectos locales sino también una estimación de la *vulnerabilidad* sísmica de las edificaciones (incluyendo viviendas y edificios especiales) y también de las líneas vitales, como paso previo a la estimación de daños (daños en edificación, pérdidas económicas, efectos en personas,...).

La gran importancia del factor vulnerabilidad en los daños producidos por terremotos es indiscutible. Sirva como ejemplo los recientes terremotos en Turquía de agosto y noviembre de 1999 en los que ha habido que lamentar un gran número de víctimas debido a la alta vulnerabilidad de las edificaciones. La gran importancia del factor vulnerabilidad en el riesgo sísmico hace que incluso en zonas de peligrosidad sísmica moderada los daños pueda alcanzar niveles elevados.

El objetivo de este artículo es describir diferentes técnicas de zonación y microzonación sísmica, cubriendo diferentes aspectos de la peligrosidad sísmica, los efectos locales y de la vulnerabilidad y escenarios de daños. En los efectos locales sólo se trata el efecto de la geología local en el movimiento en superficie, dejando fuera del ámbito de este trabajo los fenómenos inducidos, de gran importancia en la planificación territorial, como son los movimientos en masa y la licuefacción. Los diferentes conceptos y metodologías se ilustran con ejemplos de trabajos realizados en Cataluña y en la ciudad de Barcelona.

2. ZONACIÓN SÍSMICA A ESCALA REGIONAL: MAPAS DE PELIGROSIDAD

En otros trabajos de este mismo volumen se discuten distintos aspectos relacionados con la evaluación de la peligrosidad sísmica. Aquí se comentan las distintas etapas de un proceso de zonación de un territorio, desatancado algunos aspectos críticos.

2.1. Datos

La confección de mapas de zonas sísmicas comporta una recopilación previa de información tanto sísmica como geológica.

Catálogos sísmicos

Es necesario una revisión de los catálogos sísmicos, de muy especial importancia en zonas de sismicidad moderada donde con mucha frecuencia los sismos más importantes han ocurrido en el pasado no reciente. Una comparación crítica de las diferentes fuentes, además de la inclusión de las investigaciones recientes, lleva a la obtención de un catálogo homogéneo para los cálculos de peligrosidad. Esta metodología de comparación de catálogos es especialmente de interés en zonas donde la sismicidad está situada en zonas frontera de dos o más países como sucede para la mayoría de naciones europeas. Las compilaciones realizadas independientemente a un lado u otro de las fronteras ha conllevado a la aparición de numerosos errores, duplicaciones de sismos, localizaciones distintas, asignación de intensidades distintas para un mismo sismo, etc. Esta necesidad motivó la realización de un proyecto europeo (Albini y Stuchi, 1997) para armonizar las informaciones de diferentes países, cuya aplicación al NE de España y Sur de Francia dió lugar a un nuevo catálogo (Susagna y Goula, 1999).

Zonación Sismotectónica

En áreas de actividad sísmica moderada en las que no siempre es posible relacionar los epicentros de terremotos con fallas conocidas, es más adecuado, desde un punto de vista práctico, introducir el concepto de zona sismotectónica más que la noción de falla activa. La hipótesis básica es considerar que la heterogeneidad de la corteza terrestre puede explicar la distribución de la sismicidad. Las zonas sismotectónicas son consideradas como áreas en las cuales la probabilidad de ocurrencia de un sismo determinado será la misma en cada uno de sus puntos.

La zonación tectónica es el primer paso para una zonación sismotectónica. Esta zonación puede tener en cuenta los parámetros geológicos más representativos de la corteza, principalmente aquellos que provienen de la propia estructura geológica (Grellet et al., 1993).

Los parámetros geológicos y geofísicos seleccionados pueden ser:

- Discontinuidad de Mohorovicic o espesor de la corteza.
- Deformación hercínica, grado de deformación moderada de la serie sedimentaria paleozoica, dominio frágil con cabalgamientos y dominio dúctil con desarrollo de esquistosidad.
- Isobatas del zócalo o profundidad en la que se encuentra el basamento.

- Estado de la deformación de la cobertera sedimentaria meso-cenozoica, como indicador de la deformación alpina.
- Tectónica neógena, indicador de los procesos extensionales cenozoicos.
- Distribución de los niveles evaporíticos como niveles preferenciales de despegue.

Las variaciones de distintos parámetros en relación con la deformación que caracterizan los distintos temas geológicos permite una primera definición de zonas tectónicas homogéneas. Así se pueden definir distintas zonas tectónicas atendiendo a distintos criterios como los descritos en el ejemplo de la tabla 2.1 para Cataluña (Fleta et al., 1996).

Cuando se incorpora la distribución de los sismos a la zonación tectónica se pueden añadir nuevas zonas o modificar límites para tener en cuenta distribuciones de sismicidad no explicables por parámetros puramente geológicos. Como ejemplo, en la figura 2.1 se muestra la sismicidad junto con la definición de las zonas sismotectónicas utilizada en los cálculos de peligrosidad para Cataluña (Goula et al., 1997; Secanell, 1999). Las zonas fronterizas con Francia propuestas en esta zonación están de acuerdo con estudios similares realizados en Francia (Autran et al., 1998). Cabe señalar que tres de las once zonas sismotectónicas han estado definidas únicamente con criterios de distribución de la sismicidad.

Tabla 2.1. Zonas tectónicas para Cataluña y criterios utilizados para su clasificación (según Fleta et al., 1996)

ZONAS TECTÓNICAS			CRITERIOS
DOMINIO DEFORMADO A	PIRINEOS	ZONA AXIAL CENTRAL A1a	Corteza engrosada (> 35 km) Zócalo deformado
		ZONA EXTERNA SUR A1b	Zócalo profundo (> 3 km) Cobertera sedimentaria deformada y despegada
		ZONA AXIAL ORIENTAL A1c	Zócalo aflorante Corteza intermedia
	A1	CUENCAS ORIENTALES A2a	Tectónica neógena Zócalo superficial
	SISTEMA MEDITERRÁNEO	CORDILLERA NORD-IBÉRICA A2a	Zócalo hercínico deformado Estructuración neógena distensiva
	A2	CORDILLERAS OCCIDENTAL IBÉRICAS ORIENTAL A2b	Cobertera deformada y desplazada Cobertera deformada y desplazada Tectónica neógena distensiva
	A3	CUENCA CATALANOBALEAR	Corteza adelgazada (< 20 km)
	A4	CUENCA DEL EBRO DEFORMADA	Cobertera sedimentaria deformada y desplazada Corteza de espesor normal (30 km)
	DOMINIO NO DEFORMADO B	CUENCA DEL EBRO NO DEFORMADA	Antepaís no deformado Espesor de corteza normal (30 km) Cobertera sedimentaria no deformada

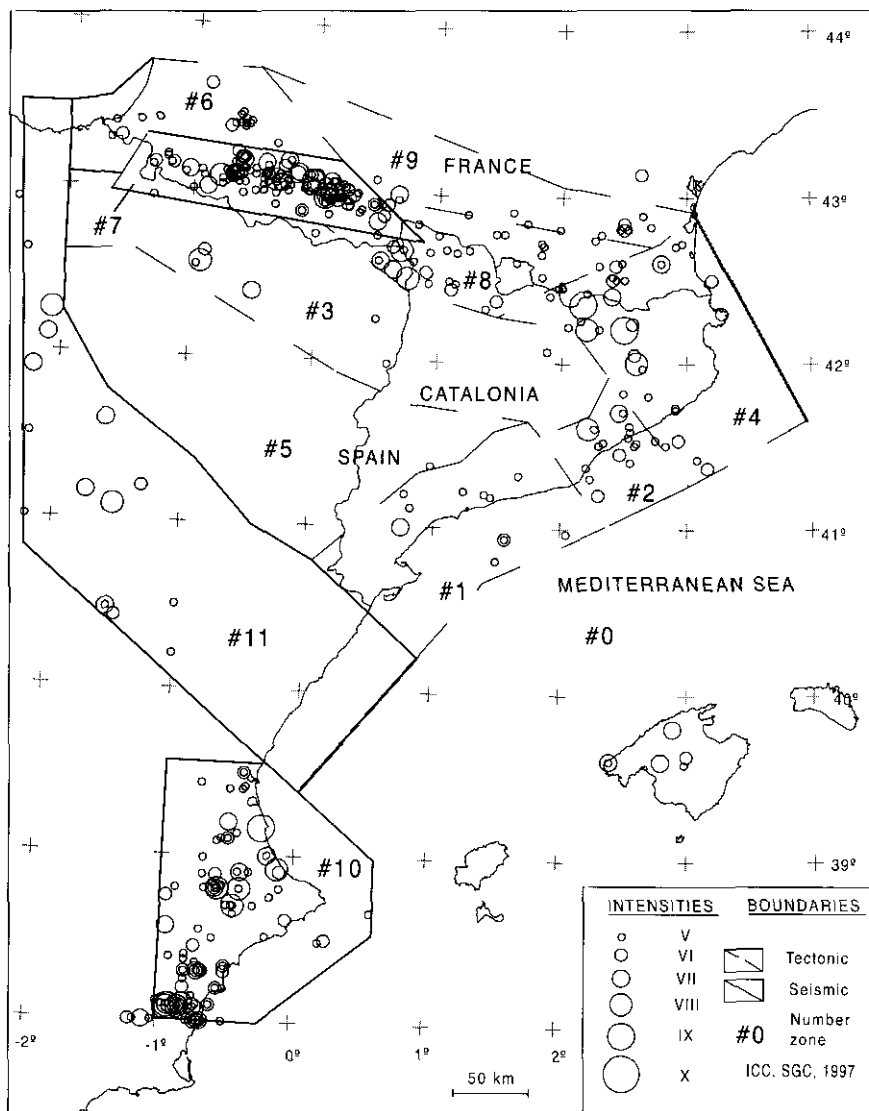


Figura 2.1. Zonación sismotectónica de Cataluña y regiones vecinas (según Goula et al., 1997).

La transparencia en los criterios utilizados en una zonación sismotectónica puede facilitar una revisión futura. Es frecuente, no obstante, que para muchos mapas de peligrosidad publicados se desconozca claramente la zonación utilizada, o más aun, los criterios seguidos para llegar a ella.

2.2. Mapa de peligrosidad determinista

Para la evaluación de la peligrosidad podemos seguir un proceso que tenga en cuenta la sismicidad conocida de la región y un modelo de atenuación de la intensidad con la distancia que nos permita asignar el valor de intensidad máxima que probablemente se haya percibido en cada punto del territorio a lo largo de su historia sísmica. Con este proceso podemos obtener un mapa de peligrosidad sísmica mediante un modelo determinista definido como el mapa de intensidades máximas probablemente percibidas.

2.3. Mapa de peligrosidad probabilista

Modelos de ocurrencia

Para la evaluación probabilista de la peligrosidad el método más extensamente utilizado se basa en un modelo de ocurrencia de terremotos de tipo Poissoniano estacionario. Este modelo permite la realización de mapas de peligrosidad estáticos que facilitan su aplicación.

Es conveniente de todas formas investigar previamente qué modelo es el que mejor se adecua a la sismicidad de la zona, modelos estacionarios y modelos no estacionarios.

En el estudio realizado en Cataluña citado anteriormente se han utilizado distintos modelos: distribución de Gutenberg-Richter doblemente truncada, las distribuciones de valores extremos Gumbel I y III y el modelo poissoniano no estacionario propuesto por Savy (1978). La aplicación del último modelo al catálogo de sismicidad de Cataluña ha permitido obtener como resultado un comportamiento cuasi estacionario de la sismicidad de la región (Secanell et al., 1998) por lo que el modelo de Gutenberg-Richter resulta adecuado para los cálculos de peligrosidad.

Atenuación de la intensidad sísmica

La ley de atenuación de la intensidad con la distancia epicentral utiliza generalmente dos parámetros ajustables, el coeficiente de atenuación anelástico y la profundidad del foco sísmico. Estas leyes de atenuación se ajustan para los sismos de los que se dispone de datos suficientes de intensidad puntual. En el caso de Cataluña los ajustes muestran una baja atenuación de la intensidad

con valores del coeficiente de atenuación anelástico inferiores a $0,001 \text{ km}^{-1}$. Los valores del otro parámetro, la profundidad focal, oscilan entre 5 y 15 km.

Evaluación de la peligrosidad

Una vez definidas las leyes de atenuación para cada zona sismotectónica se realizan los cálculos de peligrosidad sísmica basados en un modelo de Cornell (1968), modificado por McGuire (1976), con el modelo de ocurrencia escogido (distribución de Gutenberg-Richter).

El proceso de cálculo, en este tipo de modelo, puede resumirse de la forma siguiente:

- 1) Para cada una de las zonas sismotectónicas, como las mostradas en la figura 2.1, se ajustan los parámetros característicos del modelo de ocurrencia.
- 2) Se propagan los efectos de todas las distribuciones de probabilidad de ocurrencia de sismos de cada zona a todos los puntos del territorio teniendo en cuenta las leyes de atenuación de intensidad con la distancia.
- 3) En cada uno de los puntos se combinan los efectos sísmicos que provienen de cada zona y se calcula la probabilidad de superar distintos valores de intensidad.

Un análisis de la incertidumbre de los resultados es recomendable. Un análisis de sensibilidad mediante la generación de casos por un proceso de Montecarlo permite determinar el error cometido en el cálculo directo de la peligrosidad sísmica de una manera más realista que la multiplicación de los errores de cada una de las fases del proceso (Secanell et al., 1998, Secanell, 1999).

2.4. Mapa de zonas sísmicas

Con el fin de tener en cuenta la información aportada por los dos procedimientos, uno determinista y otro probabilista, y teniendo en cuenta el margen de intensidades que nos permite el análisis de incertidumbres, se realiza un mapa de zonas sísmicas, como el de la figura 2.2, que plasma ambos resultados. El mapa de la figura 2.2 se ha constituido en base a un mapa probabilista para un período de retorno de 500 años modificado en medio grado de intensidad si la diferencia de intensidad con el mapa determinista es mayor de

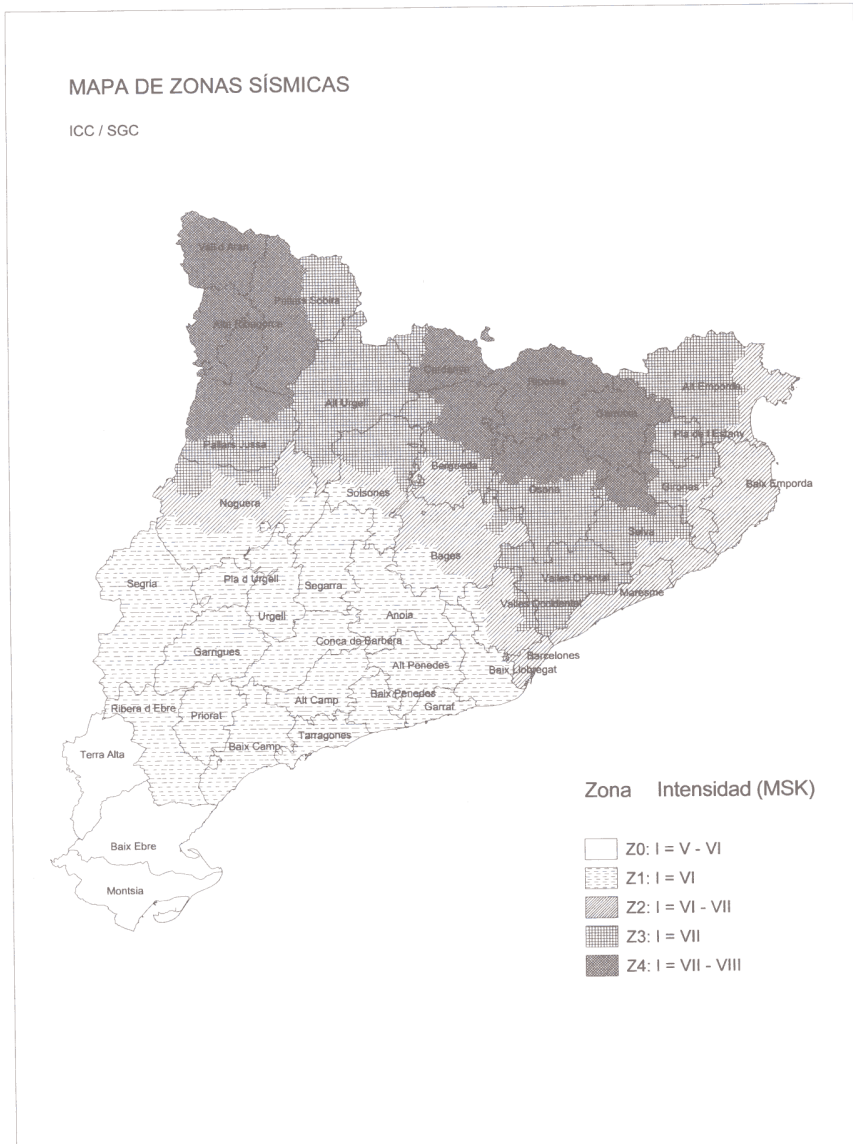


Figura 2.2. Mapa de zonas sísmicas de Cataluña (según Secanell, 1999).

1 grado. En el mapa se distinguen cinco zonas sísmicas cuyos límites se han hecho coincidir con los límites municipales para facilitar su aplicación a planes de emergencia.

Otro factor a considerar es la posible amplificación del movimiento del suelo debido a la presencia de suelos blandos. La velocidad de las ondas S parece ser el factor más importante que afecta a la amplificación de los movimientos sísmicos. Un procedimiento usual es considerar los datos de velocidad de los 30 primeros metros de la capa superficial del suelo (Borcherdt, 1994).

Un análisis de la geología superficial de cada uno de los núcleos urbanos de los municipios del mapa de la figura 2.2 permite una primera clasificación geotécnica en cuatro tipos de suelo (R, A, B y C) asociada a la velocidad de las ondas S (Fleta et al, 1998). En esta clasificación el suelo tipo R corresponde a roca dura donde la velocidad de las ondas S es superior a 800 m/s. El tipo A corresponde a rocas compactas, con velocidades de las ondas S entre 800 y 400 m/s. El suelo tipo B, materiales semi-compactados, con velocidades de ondas S entre 400 y 150 m/s. Y finalmente el suelo tipo C que corresponde a material no cohesionado y arenas con velocidades de ondas S inferiores a 150 m/s. Los 944 municipios del mapa de la figura 2.2 se distribuyen de la forma siguiente: un 27% de tipo R, un 45% de tipo A, un 20% de tipo B y un 8% de tipo C.

De acuerdo con el estudio de Borcherdt (1991) debería considerarse unas modificaciones en la intensidad según estos 4 tipos de suelo. Las modificaciones de la intensidad se entienden respecto a roca dura y hay que tener en cuenta que las intensidades consideradas del catálogo macrosísmico ya tienen en cuenta, en parte, el efecto local, por lo que el incremento deberá ser modulado. Así, se propone un incremento de medio grado en la intensidad para los núcleos urbanos con tipos de suelo B y C.

2.5. Intensidad-aceleración

Los mapas de peligrosidad se obtienen usualmente a partir de las observaciones macrosísmicas y el uso de la intensidad permite hacer el puente entre el fenómeno sísmico y los daños que causa. A pesar de su utilidad en análisis regionales para evaluar los efectos de los terremotos, el diseño antisísmico de estructuras necesita definir la acción sísmica por medio de parámetros físicos medibles como por ejemplo la aceleración.

Una de las maneras más usuales de presentar la peligrosidad es en términos de aceleración máxima (PGA), que se define como el valor máximo absoluto de la serie temporal representativa de la aceleración del suelo. Su uso práctico parece poco recomendable ya que la aceleración máxima es un parámetro muy sensible a las condiciones de registro (geología e instrumento), no está asociado a una frecuencia en particular y es difícil de predecir debido al carácter aleatorio de la complejidad de la ruptura que la genera.

Por otro lado las formas espectrales utilizadas junto con el valor de PGA en normas de construcción sísmoresistente y en normas de la industria nuclear en la mayoría de países tienen su origen en análisis estadísticos realizados en una época donde existían pocos registros y además sin una clasificación fina del tipo de suelos. No obstante, los grandes terremotos producen mayor proporción de bajas frecuencias que de altas, en relación a terremotos más pequeños, por lo que una forma espectral única no es adecuada.

En las últimas décadas ha habido un gran progreso en el estudio de movimientos intensos cuyos análisis han permitido estimaciones empíricas más fiables de la acción sísmica y los factores que más influyen en ella. Recientemente, han habido proposiciones en EEUU de usar espectros variables para definir la zonificación sísmica y no el PGA e igualmente de considerar la posibilidad de variaciones más importantes en los valores espectrales y PGA referidos a los distintos tipos de suelos (Martin and Dobry, 1994). Es necesario también ese tipo de iniciativas para la modificación de la definición de las acciones sísmicas propuestas en el Eurocódigo-8, basadas en los antiguos espectros.

3. ZONIFICACIÓN SÍSMICA A ESCALA REGIONAL. VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO

Para llevar a cabo la evaluación preliminar del riesgo sísmico a escala regional, enfocada hacia la prevención sísmica, en particular en regiones de actividad sísmica moderada, en las que consecuentemente no se dispone de relaciones detalladas de daños de pasados terremotos, es necesario desarrollar y aplicar una metodología adaptada a esas circunstancias .

Chávez (1998) y Chávez et al (1998) han establecido un procedimiento para realizar una clasificación a escala regional de las edificaciones de vivienda, en clases de vulnerabilidad acordes con la Escala Macrosísmica Europea (EMS-92). Asimismo, han obtenido matrices de probabilidad de daños acordes a esta escala, de tal forma que se pueda determinar, de manera estadística, el daño potencial en las edificaciones a causa de la ocurrencia de un determinado evento sísmico. La metodología permite determinar el grado de daño que experimentarían dichas edificaciones para las intensidades macrosísmicas asignadas a cada uno de los municipios en el mapa de zonas sísmicas de la región. Por último, se hace una estimación del daño a la población expuesta al posible terremoto y se evalúa el costo económico de reparación y reconstrucción de las edificaciones que podrían resultar dañadas.

La metodología desarrollada se resume en cuatro fases: clasificación de las edificaciones de vivienda en clases de vulnerabilidad de acuerdo a la

EMS-92, estimación del daño potencial que experimentarían los edificios al ser sometidos a la acción sísmica considerada en cada municipio, estimación del daño a la población y estimación de las pérdidas económicas que se produzcan como consecuencia del daño físico a las edificaciones.

La necesaria planificación de posibles emergencias sísmicas ha motivado la proposición de esta metodología y su aplicación a Cataluña, buscando dar respuesta a lo indicado en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico.

3.1. Clasificación de las edificaciones en clases de vulnerabilidad EMS-92

La clasificación de los edificios de vivienda de Cataluña (cerca de un millón) en clases de vulnerabilidad acorde con la EMS-92 se ha llevado a cabo partiendo principalmente de los datos del censo de edificios realizado en 1990 por el *Institut d'Estadística de Catalunya*. Esta información, disponible para cada uno de los municipios de la región, está compuesta por la edad, la altura y la localización de dichos edificios. Es muy bien sabido que los dos primeros elementos intervienen considerablemente en la vulnerabilidad de los edificios. La edad es un parámetro que no sólo afecta directamente el proceso de deterioro de la resistencia de los edificios, sino que también refleja las técnicas constructivas que se van utilizando a través del tiempo. Atendiendo a esto, las edificaciones han sido agrupadas de acuerdo a tres períodos de construcción: anteriores a 1950, entre 1951 y 1970 y posteriores a 1970. La altura, por su parte, influye también en el comportamiento de las edificaciones frente a la sollicitación sísmica. En el caso de los edificios de Cataluña, que han sido construidos únicamente para resistir cargas gravitacionales, este parámetro ha servido para diferenciar aquéllos que tienen márgenes de seguridad para resistir estas cargas y los que se encuentran en el límite de resistencia. Los límites de altura considerados han sido los 12 m (menos de 5 plantas), que corresponden al primer grupo y los 18 m (con más de 5 plantas) correspondientes al segundo grupo y a los edificios con más de 5 plantas. Asimismo, se ha considerado un tercer grupo que incluye los edificios que se encuentran en el rango comprendido entre los dos extremos definidos. Por último, ha sido importante considerar la localización porque puede influir en la calidad de la construcción, tanto por los materiales utilizados y por el cumplimiento o no de normativas de construcción. En cuanto a este último parámetro se ha diferenciado entre los edificios construidos en zonas urbanas y los que se encuentran en áreas rurales. En la tabla 3.1 se presenta una distribución de los edificios de toda Cataluña atendiendo a estos tres parámetros.

Tabla 3.1. Distribución de los edificios de vivienda de Cataluña según altura, período de construcción y ubicación (según Chávez, 1998)

Fecha de Construcción		Hasta 1950		1951-1970		Después de 1970	
Área de Localización		Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Altura	< 5 plantas	232.740	31.119	212.070	16.304	315.504	37.346
	= 5 plantas	7.065	9	14.083	24	11.937	22
	> 5 plantas	12.699	2	21.963	33	22.028	44

Como se observa en esta tabla, la gran mayoría de los edificios de Cataluña, alrededor del 90%, se encuentran localizados en núcleos urbanos; similar porcentaje se determina para las edificaciones menores de 5 plantas; en cuanto a la distribución por edad, se advierte el mayor crecimiento de la construcción a partir de 1970, con un 41%.

Otra información utilizada en la clasificación de las edificaciones en clases de vulnerabilidad fue la tipología estructural y el estado de conservación de los edificios. Las diferentes tipologías estructurales utilizadas en Cataluña han sido identificadas a partir de las épocas de construcción consideradas.

La ponderación de toda la información disponible, junto con los criterios de la EMS-92 y el juicio de experto permitió llevar a cabo una clasificación de las edificaciones que se expresa en función de los tres principales parámetros, tal como se observa en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Clasificación de los edificios de Cataluña por alturas y edades expresada en porcentajes relativos de las clases de vulnerabilidad de la EMS-92 (según Chávez, 1998)

Fecha de Construcción		Hasta 1950		1951-1970		Después de 1970	
Área de Localización		Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Altura	< 5 plantas	20% A 80% B	30% A 70% B	5% A 50% B 45% C	15% A 70% B 15% C	85% C 15% D	5% A 20% B 65% C 10% D
	= 5 plantas	20% A 80% B	40% A 60% B	10% A 60% B 30% C	20% A 70% B 10% C	5% A 20% B 65% C 10% D	10% A 30% B 55% C 5% D
	> 5 plantas	40% A 60% B	60% A 40% B	15% A 70% B 15% C	30% A 65% B 5% C	8% A 27% B 60% C 5% D	15% A 45% B 40% C

Aplicando la clasificación indicada en esta tabla a todos los edificios de Cataluña se ha obtenido que la mayoría de ellos corresponden a las clases de vulnerabilidad B y C, con 40 y 45% respectivamente. Por consiguiente, los menores porcentajes corresponden a las clases de vulnerabilidad, más y menos vulnerable, A y D, con una representación de 9 y 6% cada una.

La clasificación indicada en la tabla 3.2 fue también aplicada a cada uno de los municipios de Cataluña, obteniéndose los porcentajes de las clases de vulnerabilidad A, B, C y D presentes en cada municipio. Como ejemplo se muestra en la figura 3.1 la distribución de la clase A, una de las que tiene menor presencia en la región, al igual que la D, en oposición a las clases B y C que alcanzan valores, en muchos de los municipios, de hasta el 80% de los edificios. Como se observa en esta figura, el mayor porcentaje de edificios clase A, alrededor del 30%, se localiza en muy pocos municipios situados en el centro de Cataluña, los cuales tienen muy baja densidad de población y edificación. La mayoría de los municipios presentan en su parque edificativo entre un 7 y un 18% de edificios clase A.

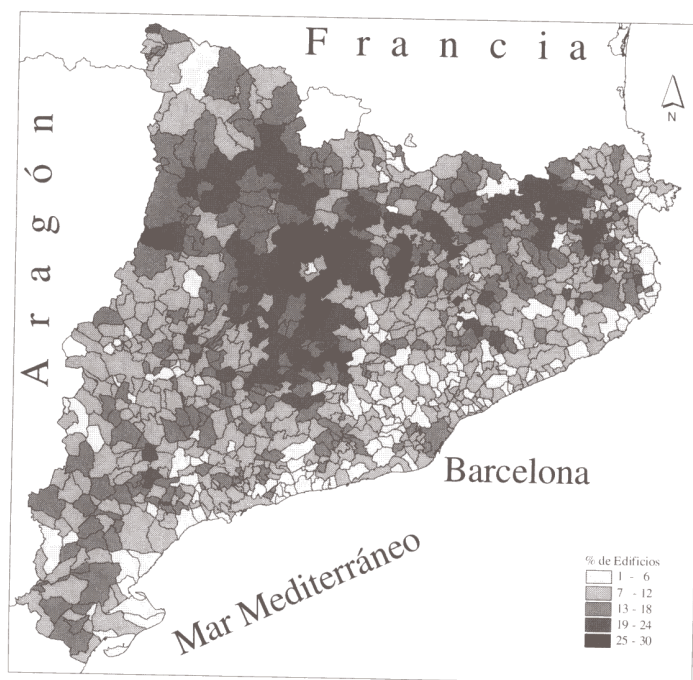


Figura 3.1. Distribución de la clase de vulnerabilidad A en los municipios de Cataluña (según Chávez, 1998).

3.2. Estimación del daño en las edificaciones

La estimación del daño que podrían experimentar las edificaciones de vivienda de los diferentes municipios, considerando la ocurrencia de un evento sísmico como el indicado en el mapa de zonas sísmicas representado en la figura 2.2, se ha llevado a cabo mediante el uso de matrices de probabilidad de daños que han sido determinadas para las clases de vulnerabilidad A, B, C, D, E y F, los grados de daños de 0 (no daño) a 5 (colapso total) y los grados de intensidad (de VI a X) de la escala EMS-92 (Chávez, 1998). Los cálculos se realizan de forma determinista, a partir de la expresión:

$$P[D_k] = \sum_T P[D_k | I, T] \cdot P[T] \quad [1]$$

dónde,

$P[D_k]$, es la probabilidad de que en un determinado municipio se observe un nivel de daño D_k ($K = 0 - 5$) para una intensidad I ;

$P[T]$, es la probabilidad de que la edificación pertenezca a la tipología T , identificada como las clases de vulnerabilidad A, B, C y D;

$P[D_k | I, T]$, es la probabilidad condicionada de que se observe el nivel de daño k , dada la intensidad I y la tipología de la estructura T . Esta probabilidad se corresponde con la de las matrices de probabilidad de daños.

Con esta expresión y para las intensidades representativas en Cataluña (VI, VII y VIII) se realizan las estimaciones de los daños en los edificios de vivienda de los diferentes municipios, los cuales, como resultado, se obtienen clasificados en función de los seis niveles de daños antes indicados.

Es importante indicar que esta distribución de daños no es una situación simultánea a todos los municipios, sino que responde a las intensidades definidas para cada uno de ellos en el mapa de zonas sísmicas, no pudiendo en realidad interpretarse como un escenario para ningún terremoto posible.

A partir del daño experimentado por los edificios se hizo una estimación de los que podrían quedar en condiciones inhabitables, considerándose en este estado aquéllos que sufran los grados de daños 4 y 5 así como un 50% de los que experimenten daño 3. Estos resultados son de suma importancia para la evaluación del número de personas que pueden quedar sin vivienda tras la acción del terremoto.

Por otra parte se ha hecho una clasificación de los municipios según la distribución de los diferentes grados de daño, con el objetivo de presentar una visión global del deterioro por municipios. En este sentido se han determinado tres grupos de municipios:

- ligeramente dañados, cuando menos del 20% de sus edificios sufrirían daños superiores al grado 1;
- moderadamente dañados, cuando entre un 20% y un 40% de sus edificios sufrirían daños superiores al grado 1;
- seriamente dañados, cuando el municipio tendría más del 40% de sus edificios con daños superiores al grado 1.

En la figura 3.2 se presenta el resultado de aplicar esta clasificación al conjunto de municipios de Cataluña. Aproximadamente un 25% de municipios estaría en la categoría de seriamente dañados, la mayoría situados en la parte Norte, otro 25% moderadamente dañados y un 50% ligeramente dañados.

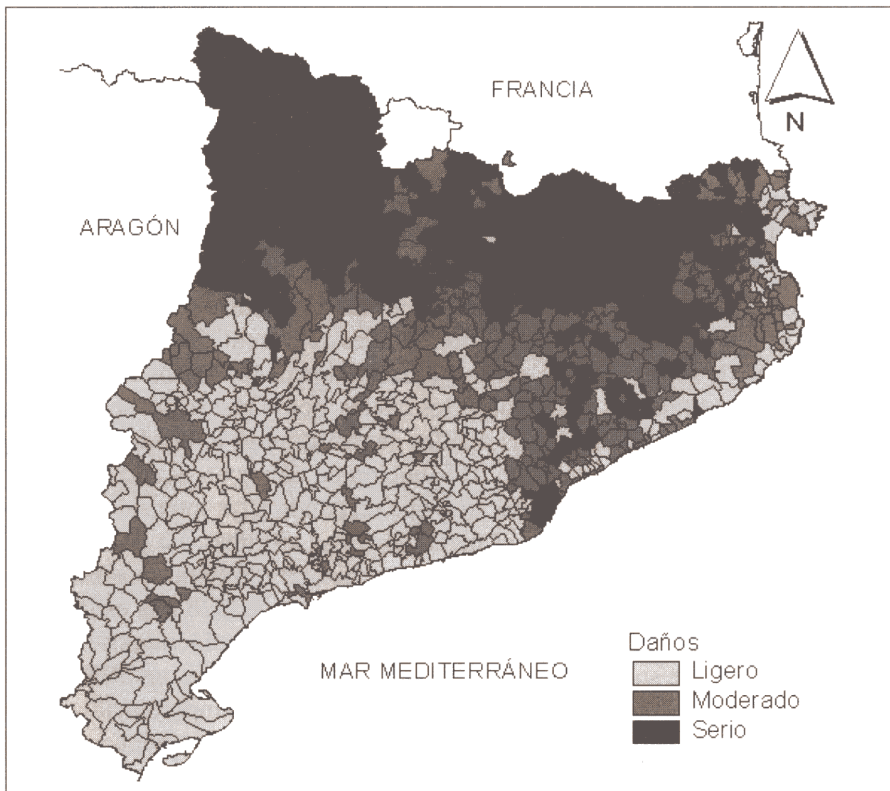


Figura 3.2. Clasificación de los municipios de Catalunya en tres categorías, definidas en el texto, en función de la severidad del daño que podrían experimentar en caso de percibirse una intensidad igual a la prevista en el mapa de zonas sísmicas, considerando el efecto de amplificación de suelos (según Chávez, 1998).

3.3. Estimación del daño a las personas

La estimación del daño a la población, expresado en términos de heridos y muertos se realizó utilizando las metodologías desarrolladas por Coburn *et al.* (1992) y ATC-13 (1985). La primera permite evaluar las víctimas provocadas por el colapso de edificios, o sea grado de daño 5; mientras que, la segunda proporciona una distribución de víctimas en función de cada uno de los grados de daño antes indicados.

En general, la mayoría de los municipios no superaría las 10 personas heridas; sin embargo existen lugares en los que este número podría llegar hasta las 1.000 personas e incluso superarlo, como en Barcelona y sus alrededores.

Por otra parte, la estimación del número de personas sin vivienda se realizó como el producto entre los edificios inhabitables y el número de personas promedio por edificio en cada municipio. Las estimaciones obtenidas indicarían que en la mayoría de los municipios entre 10 y 100 personas podrían quedar sin vivienda; un importante número de municipios se encuentra en el rango de 100-1.000 personas, siendo pocos los municipios que superarían estos valores.

3.4. Estimación de pérdidas económicas

La estimación de las pérdidas económicas ha sido realizada teniendo sólo en cuenta el daño de los edificios. Se realiza como el producto entre el valor del daño observado en el edificio y el valor de la reposición de dicho edificio.

Las pérdidas estimadas por municipio oscilarían entre las 0 pesetas y cerca de 500,000 millones de pesetas. Afortunadamente, la gran mayoría de los municipios se encuentran en los rangos de menores pérdidas; las pérdidas menores de los 100 millones de pesetas se localizan en toda la parte central de Cataluña y en pequeños municipios situados al noreste de la región. Las que oscilarían entre los 100 y 1,000 millones de pesetas corresponden al mayor número de municipios. Muy pocos son los municipios cuyas pérdidas superarían los 10,000 millones de pesetas.

4. MICROZONACIÓN SÍSMICA

Hasta aquí se han considerado los aspectos de la evaluación del riesgo sísmico que pueden ser tratados a escala regional y que por tanto dan lugar a una zonificación del territorio a esta escala. Es de interés en muchos casos poder

realizar estimaciones del riesgo a mayores escalas, como puede ser el estudio de una ciudad o de distritos de ella o, más aun, de edificios individuales.

Dos aspectos, en particular, del análisis del riesgo pueden tener un tratamiento específico según la escala del análisis que queramos realizar:

- los efectos de amplificación local del movimiento del suelo debido a la presencia de suelos blandos o de topografías abruptas, y
- la consideración de la vulnerabilidad sísmica de los edificios y los escenarios de daño.

4.1. Técnicas de evaluación de los efectos locales

En general la modelización del efecto de suelo se hace a través de la estimación de la función de transferencia, que consiste en la relación espectral entre un registro en un emplazamiento dado y un registro situado en un emplazamiento de referencia, que suele tratarse de roca dura. Puede ser también de importancia el aumento de la duración de la acción sísmica.

Los métodos pueden clasificarse en dos grandes grupos: numéricos y experimentales.

Métodos numéricos

Cuando se dispone de información de las características dinámicas del subsuelo del emplazamiento o del área de estudio los efectos locales pueden estimarse a partir de cálculos numéricos, más o menos sofisticados:

— Modelos simples. Son utilizables para la estimación de la respuesta de suelos blandos, no así para los efectos topográficos. Los efectos de amplificación están relacionados con efectos de resonancia que se traducen por amplificaciones en la frecuencia fundamental y en sus armónicos. Si se aproxima el suelo a una sola capa que reposa sobre basamento rocoso se puede estimar la frecuencia fundamental como $f_n = v/4h$, donde v es la velocidad de ondas de cizalla y h el espesor del depósito.

— Modelos 1D. Existen un cierto número de modelos analíticos que permiten calcular la respuesta sísmica de una columna de suelo, usando normalmente la teoría de múltiples reflexiones en un medio estratificado (Figueras, 1994). Los análisis pueden hacerse en el dominio elástico (método de reflectividad de Kennett, por ejemplo) o bien en equivalente lineal para tener en

cuenta la no-linealidad del suelo a partir de ciertas deformaciones, de manera iterativa, como realiza el programa SHAKE'91. Este último necesita conocer las curvas de variación de la rigidez y del amortiguamiento en función de la deformación.

— Modelos sofisticados. Aunque la base de cálculo es siempre la misma, es decir la ecuación de ondas, se han propuesto distintos modelos para explicar ciertas complejidades, como pueden ser ondas incidentes complejas, geometría de los depósitos 2D o 3D o comportamiento mecánico de diversa índole (visco-elástico, no-lineal, etc.). Esos métodos se pueden clasificar en cuatro grupos (Bard, 1997): i) analíticos, válidos para geometrías sencillas, ii) métodos de rayos, válidos para altas frecuencias, iii) técnicas basadas en "boundary integral" y iv) técnicas que usan diferencias o elementos finitos, más difíciles de manejar desde el punto de vista informático. Todos esos métodos son útiles para estudios fenomenológicos y de calibración de la influencia de parámetros. Su uso es, sin embargo, delicado para fines predictivos, en especial por la variedad de parámetros que entran en juego y el grado de conocimiento necesario para su utilización. Estos métodos pueden ser también útiles para ayudar a la comprensión de los efectos topográficos, peor conocidos, y para los que no existen aun suficientes observaciones para desarrollar métodos estadísticos.

Métodos experimentales

Pueden basarse en diferentes tipos de datos: observaciones macrosísmicas, medidas con registros instrumentales de terremotos y medidas de ruido sísmico (microtremors).

— Las observaciones macrosísmicas son importantes en zonas de sismicidad moderada y con una larga historia sísmica, que puede dar lugar a observaciones detalladas de variaciones en los daños según el tipo de suelo, para terremotos históricos. Las encuestas detalladas también pueden ser de gran utilidad actualmente para poner de manifiesto variaciones locales del movimiento.

— Las medidas con registros instrumentales de terremotos en roca y suelo y el cálculo de la función de transferencia suelo/roca dan los resultados más fiables si se dispone de una geometría adecuada de emplazamientos de registro (Figueras et al., 1992). No obstante, en zonas de sismicidad moderada y en áreas urbanas no es fácil poder obtener tales observaciones.

— Las medidas de ruido sísmico aparecen como uno de los métodos experimentales más sencillos de realizar y de poco coste. En las observacio-

nes basadas en una estación de referencia en roca para el cálculo de la función de transferencia el aspecto crítico es garantizar que este registro de referencia puede considerarse propiamente el movimiento de "entrada" que produce los diferentes registros en los tipos de suelo observados. Para ello el ruido registrado en roca y en suelo debe tener el mismo origen y siempre deben realizarse las medidas simultáneamente. Para evitar este problema se utilizan técnicas sin estación de referencia, mucho más fáciles de llevar a cabo en la práctica. En particular, la técnica de Nakamura (1989) se basa en el cálculo de la relación espectral entre las componentes horizontal y vertical de un mismo registro de ruido. Aunque la justificación teórica de la validez de este método lleva inherente la aceptación de una serie de simplificaciones del fenómeno difícilmente creíbles, su aplicación suele dar buenos resultados para estimar la frecuencia fundamental del subsuelo. No parece haber acuerdo sobre su significación en cuanto a los valores de amplificación.

4.2. Vulnerabilidad sísmica y escenarios de daño a escala local

En función del grado de detalle del estudio que quiera realizarse y de la información disponible sobre las características estructurales y constructivas de las edificaciones de una ciudad, podrán aplicarse diferentes metodologías.

Así, para un resultado de tipo estadístico, sin individualizar los resultados para cada edificio, puede adoptarse una metodología del tipo de la presentada en el capítulo 3, desarrollada inicialmente para una zonación a escala regional, para lo cual es suficiente conocer los datos relativos al censo de edificios y de la población y usar matrices de probabilidad de daño adecuadas.

Si se quieren afinar más los resultados y llegar a conocer la vulnerabilidad y el escenario de daños edificio por edificio, será necesario en ese caso disponer de información individualizada para cada edificio y aplicar una metodología que permita caracterizar la vulnerabilidad y el grado de daño específicos a cada situación, como puede ser el método del índice de vulnerabilidad, propuesto en Italia por Benedetti y Petrini (1984) y Angeletti et al. (1988).

Para edificios de especial importancia debido a la función que desempeñan o bien por pertenecer al patrimonio histórico o por el riesgo intrínseco que entrañan será necesario un análisis individualizado usando métodos propios del cálculo de estructuras, en el que pueden hacerse intervenir un número importante de parámetros para tener en cuenta particularidades estructurales, tales como el comportamiento dúctil por ejemplo. No entraremos a describir estos métodos, cuya aplicación es muy costosa para grandes conjuntos de edificaciones.

5. EJEMPLO DE MICROZONACIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE BARCELONA

Para ilustrar las ideas y métodos enumerados en el apartado anterior presentaremos, como ejemplo, algunos resultados preliminares de microzonación sísmica en la ciudad de Barcelona. En los últimos años se han realizado en esta ciudad diversos estudios encaminados a la evaluación de su riesgo sísmico, en los cuales han participado diversas instituciones. Los dos ámbitos principales de estudio han sido los efectos locales y la vulnerabilidad, que comentaremos a continuación.

5.1. Análisis de efectos locales

La zona dónde se sitúa la ciudad de Barcelona se considera de actividad sísmica moderada y está 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 et al., 1999) 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, dada la alta densidad de población y al alto índice de vulnerabilidad de las construcciones.

La ciudad de Barcelona 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: i) los relieves montañosos que constituyen el sustrato de la ciudad, en los que encontramos materiales Paleozoicos (metamórficos y graníticos) y los Terciarios de Montjuïc y ii) 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.

Para la estimación de efectos locales se han llevado a cabo, por una parte, trabajos de simulación numérica considerando como datos de entrada las características de los suelos inferidas a partir de una recopilación y análisis de datos geotécnicos, y por otra, varias campañas de medida experimental de la frecuencia fundamental por el método de Nakamura (1989).

Información geotécnica y simulación numérica de efectos del suelo

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. Cid (1996) definió y utilizó una metodología que permite estimar los parámetros dinámicos de los suelos a partir de los parámetros geotécnicos usuales en la obra pública, solucionando así el problema de la ausencia general de valores experimentales de las propiedades dinámicas de los suelos para Barcelona. Del ensayo de penetración estándar (SPT) u otros ensayos de penetración se deduce 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 analizaron 184 sondeos geotécnicos con un resultado de 70 columnas representativas (Figura 5.1).

En general, la información geotécnica no está 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 en 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. Estos parámetros dinámicos han sido estimados en base a diversos factores como profundidad, litología, grado de alteración y estudios previos.

Una vez definidos los modelos dinámicos unidimensionales del subsuelo en los diferentes puntos en estudio, así como 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 a las condiciones locales de la zona de estudio. Para analizar el grado de incertidumbre en los resultados se ha utilizado un proceso de Montecarlo (500 cálculos). 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

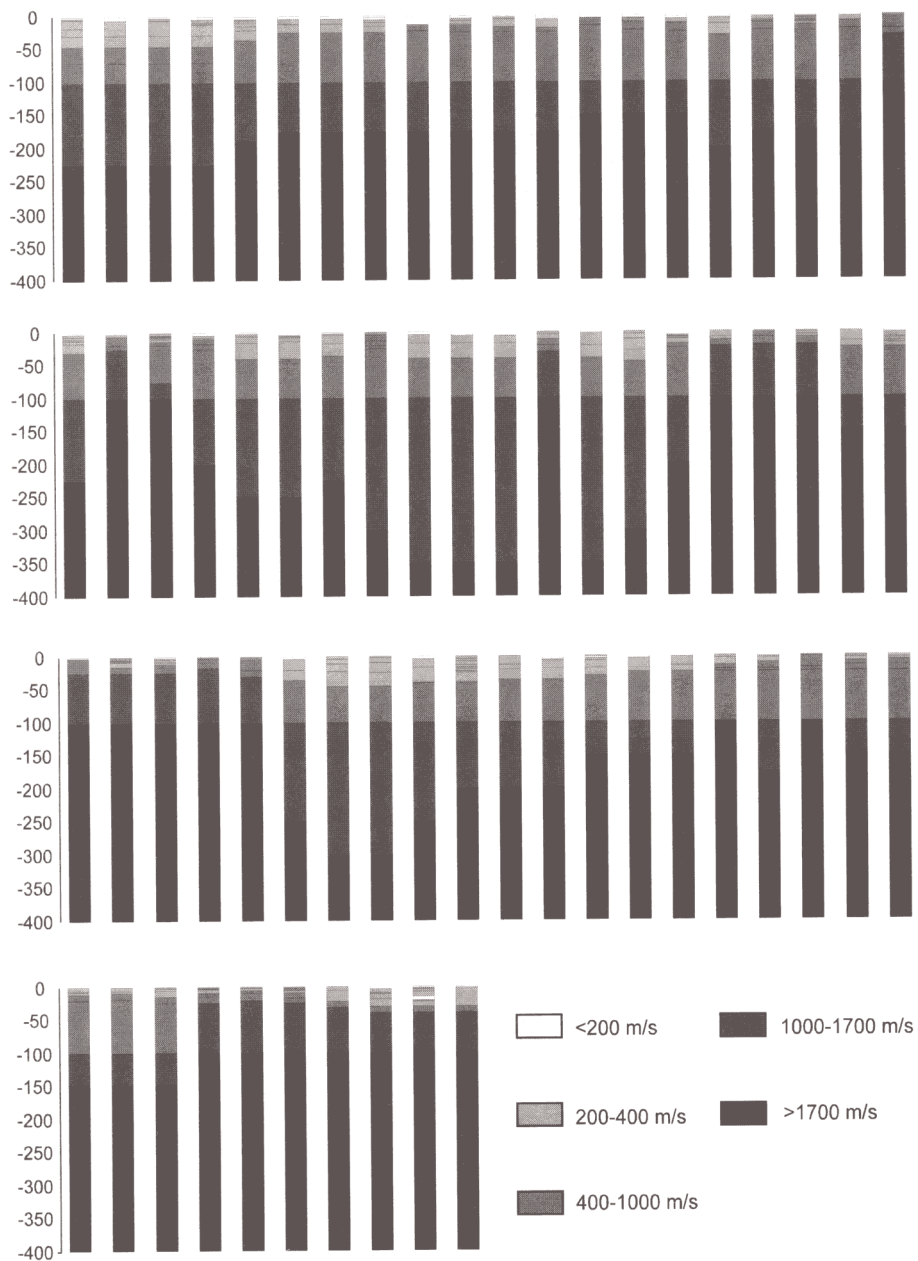


Figura 5.1. Variación de V_s obtenida para el basamento Paleozoico de las 70 columnas representativas analizadas (según Cid, 1999).

cálculo, están basadas en los datos experimentales del valle de Volvi (Cid, 1998).

Se han obtenido las funciones de transferencia entre la superficie y el basamento (considerado aflorante) para distintas señales de entrada en cada uno de los 70 puntos de estudio, promediando el resultado obtenido para 500 cálculos, resultado de la incorporación de un proceso de Montecarlo. Estos resultados permiten realizar una clasificación en tres grupos, correspondientes a 3 áreas geográficas de la ciudad (Cid, 1998; Cid et al., 1999).

En la figura 5.2 se han representado las funciones de transferencia representativas de cada zona, las cuales corresponden al promedio de las funciones de transferencia relativas a materiales terciarios aflorantes en la ciudad (emplazamiento de referencia).

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.

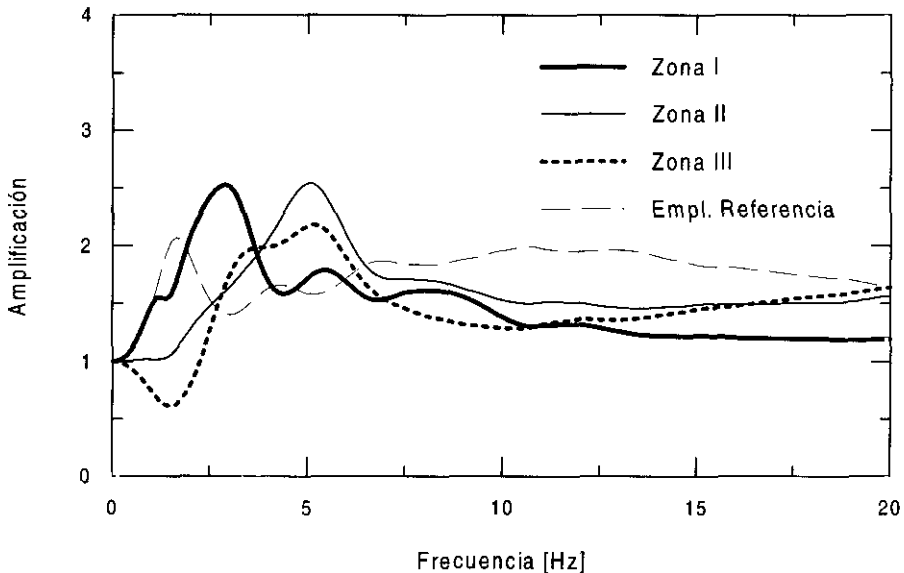


Figura 5.2. Funciones de transferencia representativas de cada una de las zonas definidas, y función de transferencia del emplazamiento de referencia, aplicando en ambas un proceso de Montecarlo (según Cid, 1999).

— 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 5.3. El incremento del nivel de aceleración máxima respecto al emplazamiento de referencia es el siguiente: Zona 0, 1; Zona I, 1.69; Zona II, 1.65; y Zona III, 1.43.

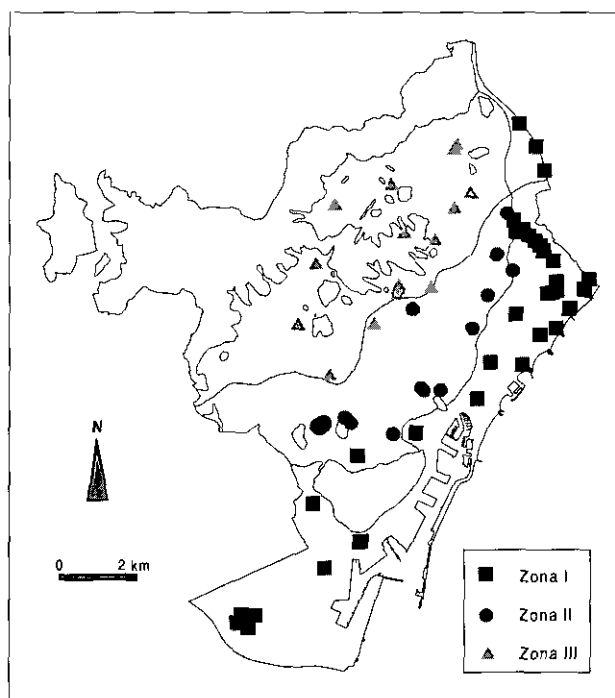


Figura 5.3. Distribución geográfica de los 70 puntos de estudio que definen la zonación sísmica de la ciudad de Barcelona. En esta figura se ha representado el contacto Terciario-Paleozoico basado en Losan (1978) (según Cid, 1999).

Medidas experimentales por el método de Nakamura

Para la estimación de los períodos predominantes del suelo se ha utilizado el muy divulgado método de Nakamura (1989), que a partir de registros de ruido ambiental en superficie determina el período fundamental de las capas de suelo desde el basamento rocoso a la superficie, mediante la relación entre el espectro de Fourier de la componente horizontal y el de la componente vertical del mismo registro.

Se realizaron unas 200 mediciones con la obtención de los períodos fundamentales del suelo de Barcelona, que cubren los diferentes tipos de materiales (Alfaro et al, 1998).

En la figura 5.4 se muestra un mapa con los valores de períodos obtenidos.

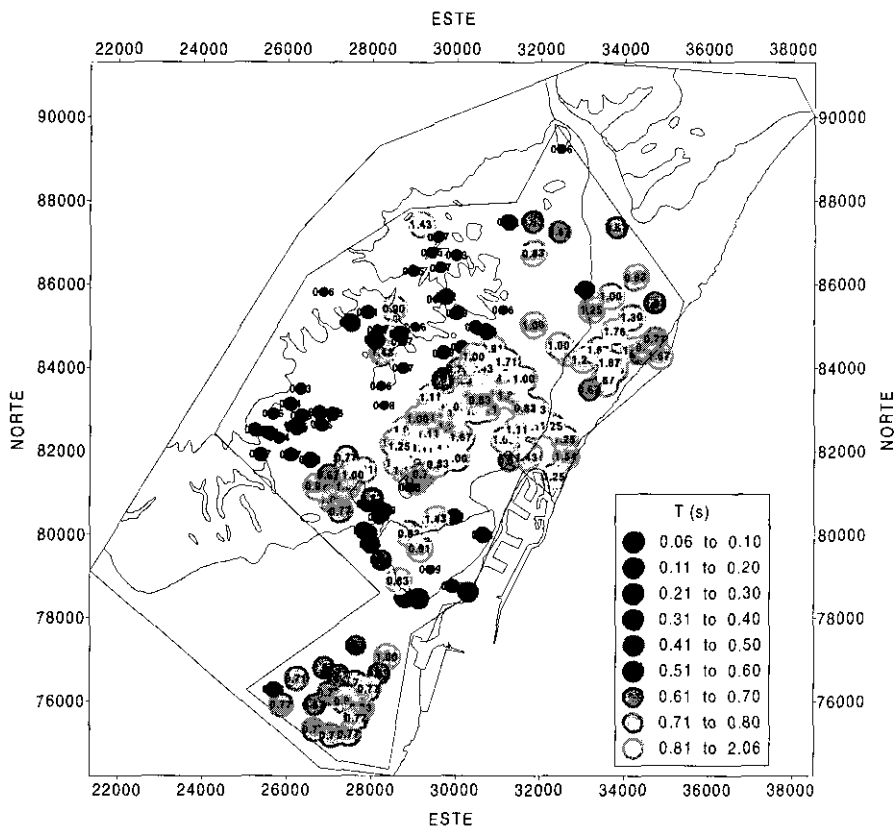


Figura 5.4. Períodos predominantes de los suelos de Barcelona (según Alfaro et al., 1998).

Los períodos para los afloramientos rocosos paleozoicos del Tibidabo y Collserola son bastante homogéneos y presentan un valor de 0,06 s. Esto se debe a que no es roca completamente sana, sino que tiene hasta 2 metros de material meteorizado cubriéndolo (Losan, 1978), y con velocidades de cizalla mayores que otros suelos.

Por otro lado, los períodos predominantes del afloramiento terciario de Montjuic son heterogéneos, van desde valores de 0,09 s hasta 0,91 s. Esto se puede deber a que esta zona se ha explotado como cantera, y se ha rellenado con materiales de calidades bien diferenciadas.

El material Cuaternario del Llano de Barcelona es el más heterogéneo de todos; esto se debe a los cambios de espesor, que van de cero en el piedemonte del Tibidabo-Collserola y Montjuic a profundidades medias de 20 m, con pequeñas zonas con profundidades de hasta 50 m. Además está cortado en innumerables sitios por rieras que van de la Sierra al Mediterráneo. Los períodos reflejan esta morfología, con valores que van de 0,10, 0,20 o 0,30 s en las zonas de mayor pendiente (Zona III de la figura 5.3) a períodos mayores de 0,70 s en la mayor parte del Llano (Zona II).

Los materiales del delta del Besós (Zona I) presentan períodos predominantes superiores a 0,50 s alcanzando inclusive el máximo valor registrado de 2,1 segundos. Finalmente la Zona Franca (también Zona I), ubicada sobre el delta del Llobregat, presenta una gran homogeneidad en los resultados obtenidos, con períodos promedio de 0,72 s.

Comparación de la simulación numérica con los resultados experimentales mediante la técnica de Nakamura

En la aplicación de técnicas de simulación numérica es preciso disponer de un buen modelo del subsuelo y, en particular del máximo de información posible sobre los parámetros geotécnicos del suelo, incluidos resultados de ensayos dinámicos, no siempre disponibles. El nivel de desconocimiento de estos parámetros va a influir lógicamente en la calidad de las simulaciones. Por otra parte, los métodos experimentales no están libres de un alto grado de incertidumbre. En particular el método de Nakamura da en general buenas estimaciones del período fundamental del suelo, pero no de los factores de amplificación. En particular en la Zona II, parte central del Llano de Barcelona, los valores encontrados con el método de Nakamura ($T > 0,7$ s) difieren significativamente de los valores del período correspondiente a la máxima amplificación ($T \approx 0,25$ s) deducidos de las simulaciones de la función de transferencia. Goula et al. (1998) y Susagna et al. (1998) muestran que la téc-

nica de Nakamura proporciona el valor del período fundamental, no del período de máxima amplificación, que en el caso de esta zona corresponde a armónicos superiores.

Es por ello recomendable en todo trabajo de microzonación sísmica no utilizar un solo método. La mejor solución es combinar técnicas numéricas con medidas experimentales.

5.2. Evaluación de la vulnerabilidad sísmica y escenarios de daño a escala local

Se han llevado a cabo diferentes estudios de vulnerabilidad de la ciudad de Barcelona utilizando diferentes metodologías. Aquí comentaremos los basados en matrices de probabilidad de daño y en índices de vulnerabilidad. Además se han realizado estudios con otras aproximaciones, como por ejemplo, la medida experimental de los períodos de vibración de edificios (Espinoza, 1999).

La ciudad de Barcelona posee 68.904 edificios según el censo realizado por el Institut d'Estadística de Catalunya en 1990, repartidos en 10 distritos y con una densidad poblacional media de 15.000 habitantes /km².

Aplicación a escala local del método de matrices de probabilidad de daño

La aplicación de la clasificación de edificios en clases de vulnerabilidad A, B, C y D de la escala EMS-92, definida en el capítulo 3 a los edificios censados en la ciudad de Barcelona da por resultado la distribución siguiente: 18% de clase A; 61% de clase B; 20% de clase C y 1% de clase D (Chávez, 1998). Esto significa que la gran mayoría de edificios de vivienda de Barcelona pertenecen a una clase de vulnerabilidad alta (18%) y media-alta (61%), mientras el resto se encuentra en las categorías media-baja (20%) o baja (1%). Si se realiza esta clasificación por distritos, la clase predominante en todos ellos es la clase B, con porcentajes que oscilan entre el 54% y el 66%. La clase A tiene una mayor presencia en los distritos con edificios más antiguos (Ciutat Vella y Eixample). La clase C, vulnerabilidad media-baja, tiene una mayor presencia en los distritos con construcciones más recientes, como por ejemplo Nou Barris con un 31% de edificios, frente a un 3% en Ciutat Vella.

Como resultado de aplicar las matrices de probabilidad de daño, propias de la escala EMS-92, para unos valores de intensidad VI, valor atribuido por

la Norma Sismoresistente NCSE-94 o bien VII, considerando estudios más recientes (Secanell et al, 1998; Secanell, 1999) se obtienen los siguientes resultados: Para la intensidad VI aproximadamente el 97% de edificios no sufrirían daño o sólo daños ligeros (grados 0, 1 y 2) y el 3% restante daños graves (grados 3, 4 o 5). Para la intensidad VII el porcentaje de daños graves aumentaría aproximadamente al 12%. Los mayores porcentajes de edificios dañados gravemente se tendrían en los distritos de Ciutat Vella y el Eixample.

Con esta metodología se puede obtener una estimación de las personas que resultarían afectadas en menor o mayor medida en cada distrito, si bien la imprecisión de estas estimaciones resulta muy elevada, debido a las distintas hipótesis que puedan ser consideradas. Se ha podido igualmente realizar una estimación de las pérdidas económicas directas debidas a los daños a los edificios, resultando ser del orden de 0,2 billones de pesetas —de 1998— para una intensidad VI y de 0,56 billones para una intensidad VII.

Aplicación del método del índice de vulnerabilidad

El método del índice de vulnerabilidad, propuesto por Benedetti y Petrini (1984) está basado en las observaciones de daños producidos por terremotos en Italia. El método consiste en identificar los parámetros más importantes que controlan el daño en caso de terremoto. Así el estudio de la configuración en planta y elevación, el tipo de cimentación, los elementos estructurales y no estructurales, el estado de conservación, el tipo y calidad de los materiales, etc. En total 11 parámetros son calificados en una escala numérica, afectada por un peso, que trata de tener en cuenta la importancia relativa de los diferentes parámetros involucrados. A partir de la suma ponderada de los valores atribuidos se obtiene un índice de vulnerabilidad I_v , con valores comprendidos entre 0 y 382,5 para los edificios de mampostería. Un método similar es también usado para edificios de hormigón armado.

Por otro lado se define un índice de daño global D, caracterizado por el estado estructural de un edificio completo después de un terremoto, como la combinación ponderada de los valores que describen el estado post-terremoto de los diferentes componentes estructurales, tales como elementos verticales y horizontales, muros y componentes no estructurales. El resultado es un valor comprendido entre 0% y 100%.

Se usan funciones de vulnerabilidad, que han sido desarrolladas de manera empírica a partir de la observación de daños (Angeletti et al., 1988) o por su simulación en el caso de disponer de pocos datos, como es el caso de edificios de hormigón (Yépez et al., 1995).

Esta metodología fue aplicada a una zona de Barcelona correspondiente a nueve manzanas del Eixample (Caicedo et al., 1994; Yépez, 1996) compuestas por 181 edificios de mampostería, 14 de hormigón armado con vigas y 23 de hormigón armado con losas planas. De los resultados obtenidos se determina que aproximadamente el 22% de los edificios presentan una vulnerabilidad alta o muy alta; el 70% es clasificado como de vulnerabilidad media o media-baja y sólo el 8% es considerado de vulnerabilidad baja. En cuanto al daño esperado para la intensidad VII, se observan un 2% de edificios con daños superiores al 40%; en el 11% de los edificios analizados se esperarían índices de daño comprendidos entre el 20% y el 40%; en los restantes 87% de edificios el índice de daño sería inferior al 20%. En la actualidad se están extendiendo estos estudios a toda la ciudad de Barcelona (Mena, 2000).

Cabe señalar que el uso de sistemas de Información Geográfica es de gran utilidad en estos trabajos ya que permite cruzar diferentes capas de información e individualizar los resultados para cada edificio o grupo de edificios.

COMENTARIO FINAL

Los estudios de zonación y microzonación sísmica que aquí se han expuesto requieren una estrecha colaboración de equipos científicos que cubran diferentes disciplinas (geología, sismología, ingeniería, arquitectura, cartografía, ...). Es además, tan o más importante contar con la participación activa de los técnicos de las administraciones, en particular en los ámbitos de edificación, infraestructuras y gestión de emergencias, que no sólo suministren datos o promulguen directrices, sino que se integren en los equipos de trabajo.

Esta aproximación ha sido la pauta seguida en los últimos años para llevar a cabo los trabajos aquí expuestos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una síntesis, realizada por los autores, de una serie de trabajos de zonación que se han llevado a cabo en Cataluña y en los cuales, además del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), han participado otras instituciones: Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITEC), Universitat de Barcelona (UB), Observatori Fabra (OF), Universidad de Almería, Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil y Direcció General d'Accions Concertades Arquitectura i

Habitatge de la Generalitat de Catalunya y Serveis de Protecció Civil de l'Ajuntament de Barcelona.

Queremos expresar nuestro reconocimiento a Sara Figueras y a Jorge Fleta, del ICC, por su importante papel en estos proyectos. Gran parte de los trabajos que aquí se utilizan como ejemplos tienen su origen en las tesis doctorales realizadas por Justina Chávez, Javier Cid y Ramón Secanell.

REFERENCIAS

- ALBINI, P. & STUCCHI, M. (1997). A Basic European Earthquake and a Catalogue for the evaluation of long-term seismicity and seismic hazard (BEECD), In: Ghazi A. and M. Yeroyani (eds.), *Seismic risk in the European Union*, vol. I, Brussels-Luxembourg, 53 -77.
- ALFARO, A., GOULA X., SUSAGNA T., PUJADES, L., CANAS, J.A., NAVARRO M. y SÁNCHEZ, J. (1998). Estimación del período predominante del suelo a partir de microterremotos. Aplicación a Barcelona. *I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Almería, 9-13 febrero 1998.
- ANGELETTI P., BELLINA A., GRANDORI E., MOETTI A. & PETRINI V. (1988). Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results. *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, vol 7, 181-186.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (1985). "Earthquake damage evaluation data for California, (ATC-13)". Redwood City, California.
- AUTRAN, A., BLÈS, J. L., COMBES, PH., CUSHING, M., DOMINIQUE, P., DUROUCHOUX, CH., GARIEL, J. C., GOULA, X., MOHAMMADIUM, B. & TERRIER (1998). Probabilistic seismic hazard assesment in France. Part One: Seismotectonic zonation. *Proc. Eleventh European Conference on Eartquake Engineering*. Paris. (CD-ROM).
- BARD, P.Y. (1997). Local effects on strong motion: basic physical phenomena and estimation methods for microzoning studies. *Proceedings of Advanced Study Course on Seismic Risk SERINA*, Tesalónica, Grecia, 229-299
- BENEDETTI D. & PETRINI V. (1984). Sulla vulnerabilita sismica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni*, Roma, n.º 149, 66-74.
- BORCHERDT, R. D. (1991). On the observation, characterization, and predictive GIS mapping of strong ground shaking for seismic zonation. A case study for San Francisco Bay region. *Proc. Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Vol. 1, 1-24.

- BORCHERDT, R. D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and justification). *Earthquake Spectra*, Vol. 10, 618-653.
- CAICEDO C., CANAS J. A., BARBAT A., YÉPEZ F., ROCA A., GOULA X. & MAÑÀ F. (1994). Seismic vulnerability assessment of buildings in Barcelona, *Proceedings of the Tenth European Conference on Earthquake Engineering*, Viena, 2, 1023-1028.
- CHÁVEZ, J. (1998). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: aplicación a Cataluña. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 343 pp.
- CHÁVEZ, J., GOULA, X., ROCA, A., MAÑÀ, F., PRESMANES, J. & LÓPEZ-ARROYO, A. Presentació de les ponències "Preliminary seismic risk assessment for Catalonia (Spain)". *Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*. París (CD-ROM).
- CID, J. (1996). Estimació dels paràmetres dinàmics dels sòls, procediment i aplicació a Barcelona. Tesis de Master. Universitat Politècnica de Catalunya, 227 pp.
- 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, 215 pp.
- CID, J., FIGUERAS, S., FLETA, J., GOULA, X., SUSAGNA, T. y AMIEIRO, C. (1999). Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona. *Ier Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Murcia. 263-271.
- COBURN, A. W., SPENCE, R. J. S. y POMONIS, A. (1992). "Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse". *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*. 5989-5994. Madrid.
- CORNELL, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* Vol. 58, 1583-1606.
- ESPIÑOZA, F. (1999). Determinación de características dinámicas de estructuras. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 168 p.
- FIGUERAS, S., ROCA, A., GOULA, X. & BLAZQUEZ, R. (1992). Larger soil amplification for stronger ground motion from SMART-1 records. *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*. Madrid.
- FIGUERAS, S. (1994). Simulació numèrica del moviment del sòl produït per terratrèmols. Aplicació a moviments febles i forts. Tesis Doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya. 279 p.
- FLETA, J., ESCUER, J., GOULA, X., OLIVERA, C., COMBRES, Ph., GRELLET, & GRANIER, Th. (1996). Zonación tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la península Ibérica (Cataluña). *Geogaceta*, Vol. 20, 853-856.

- FLETA, J., ESTRUCH, I. & GOULA, X. (1998). Geotechnical characterization for the regional assessment of seismic risk in Catalonia. *Environmental and Engineering Geophysical Society. Barcelona*.
- GOULA, X., SUSAGNA, T., FIGUERAS, S., CID, J., ALFARO, A. & BARCHIESI, A. (1998). Comparison of numerical simulation and microtremor measurement for the analysis of site effects in the city of Barcelona. (Spain). *Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*. París (CD-ROM).
- GOULA, X., SECANELL, R., SUSAGNA, T., FLETA, J. & ROCA, A. (1997). Seismic hazard assessment for Catalonia (Spain). *Proc. Second Congress on Regional Geological Cartography and Information systems*. Barcelona. Institut Cartogràfic de Catalunya. 173-177.
- GRELLET, B., COMBES, Ph., GRANIER, Th., & PHILIP, H. (1993). Sismotectonique de la France Métropolitaine. *Mémoires de la Société Géologique de France*, n.º 164, Vol. I, 76 pp., Vol. II, pl. 24, 1 carte.
- 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., PINTO, V., RIVERO, L., ROCA, J.L. & CASAS, A. (1998). Gravity anomaly map of Barcelona as a tool for determining structural framework and depth to basement in relation to seismic microzonation of urban area. *European Geophysical Society. XXIII General Assembly*. Nice.
- LOSAN (1978). Mapa geotécnico de Barcelona, Badalona, Esplugues, L'Hospitalet, Sant Adrià y Sta. Coloma. Barcelona, 32, 1 mapa.
- MARTIN G. R. & R. DOBRY (1994). Earthquake Site Response and Seismic Code Provisions, *The Quarterly Publication of NCEER*, Bulletin, vol. 8, 4, october 1994, 6.
- MC GUIRE R. (1976). EQRISK Evaluation of earthquake risk to site. Fortran computer program for seismic risk analysis. *U. S. Geological Survey*. Open File Report, 76-67, 92 p.
- MENA, U. (2000). Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (en preparació).
- NAKAMURA, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Rep of RTRF*, 30, 1, February, 25-33.
- NCSE-94 (1995). Normativa de Construcción Sismorresistente Española NCSE-94. Real Decreto 2543/94. B.O.E. 33, 8 de febrero de 1995.
- SAVY, J. (1978). Determination of seismic design parameters: a stochastic approach. The John A. Blume Earthquake Engineering Center. Department of Civil Engineering Stanford University. Report n.º 34, 215 pp.

- SECANELL, R., GOULA, X., SUSAGNA, T., FLETA, J. y ROCA, A. (1998). Analysis of seismic hazard in Catalonia (Spain) through different probabilistic approaches. *Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*. París (CD-ROM).
- SECANELL, R. (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, 335 pp.
- SECANELL, R., GOULA, X., SUSAGNA, T., FLETA, J., ROCA, A. (1999). Mapa de zones sísmiques de Catalunya. *1.º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Murcia. 251-259.
- SUSAGNA, T., CID, J., LÁZARO, R., GOULA, X., CASAS, A., FIGUERAS, S. & ROCA, A. (1998). Applying microtremor, gravity anomalies and numerical modelling methods for the evaluation of soil earthquake response in Barcelona, Spain. *Environmental and Engineering Geophysical Society*. Barcelona.
- SUSAGNA, T. & GOULA, X. (1999). Catàleg de Sismicitat, Vol. I *Atlas Sísmic de Catalunya*, (in press).
- YÉPEZ F., BARBAT A. H. Y CANAS J. A. (1995). Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmico. Monografía de Ingeniería Sísmica IS-14, *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE*, Barcelona.
- YÉPEZ F. (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 393 pp.