

Parte III

Aplicación a Barcelona (España)

Capítulo 10

La acción sísmica

10.1 Introducción

En este capítulo, se presenta una descripción general de la ciudad de Barcelona y se define la acción sísmica. Se ha elegido esta ciudad, como un caso de aplicación de las metodologías desarrolladas en este trabajo, a una zona de sismicidad baja y moderada, en la que se dispone de poca información instrumental.

En el caso de la ciudad de Barcelona, a pesar de estar localizada en una zona de sismicidad moderada, cuenta con varios estudios de vulnerabilidad y amenaza sísmica, a partir de los cuales, ha sido posible superar la ausencia de datos de aceleración, y avanzar hacia la evaluación del daño.

Afortunadamente, la acción sísmica se ha podido definir a partir de los trabajos desarrollados durante los últimos 10 años, por el Instituto Cartográfico de Cataluña. A partir de estos estudios, se presenta una descripción de la tectónica y de la sismicidad de Cataluña, junto con los mapas de amenaza sísmica propuestos por la nueva Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 y los estudios de zonificación sísmica realizados por Cid (1998).

Finalmente, se presenta la demanda sísmica esperada en la ciudad de Barcelona, en base a los espectros de respuesta de aceleración de la NCSE-02 y los propuestos por el Instituto Cartográfico de Cataluña ICC, a partir de estudios recientes.

10.2 La ciudad

Barcelona es la capital política y económica de Cataluña y, después de Madrid, es la segunda ciudad en tamaño e importancia de España. La ciudad está localizada en la costa Oeste del mar mediterráneo, a una longitud de 2° 7' 42" Este y, una latitud de 41° 24' 42" Norte (Figura 10.1). La topografía de la ciudad es variable, dándose como altitud de referencia los 12.5 m de la Plaza Sant Jaume (zona del centro). La población es de 1.505.325 habitantes (AB, 2002), concentrados en un

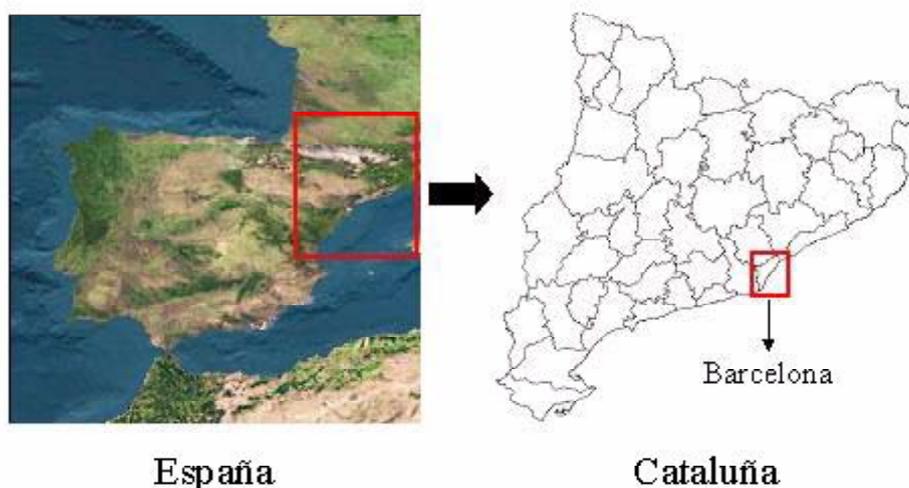


Figura 10.1. Localización de la ciudad de Barcelona.

área de aproximadamente 100 km^2 , lo que da una densidad de población de 15000 Hab/km^2 . La ciudad se estructura en 10 distritos (Figura 10.2) y está rodeada de un amplio cinturón de poblaciones y ciudades limítrofes (entre las cuales destacan los Municipios de Badalona y L'Hospitalet) que forman un área metropolitana densa donde reside casi la mitad de la población de Cataluña, que es de unos 6 millones de habitantes.

10.2.1 Geología

La ciudad de Barcelona está localizada en el plano del piedemonte de la sierra de Collserola, que corresponde a una parte de la cordillera Costera Catalana, tal y como puede verse en la Figura 10.3. Su orientación es paralela a la línea de costa y sus límites son el delta del Besòs en el noreste y, el delta del Llobregat en el suroeste.

Cid et al., (2001) distingue dentro de la ciudad dos grandes unidades geomorfológicas: 1) el relieve montañoso que constituye el basamento rocoso de la ciudad (sustrato), donde se puede encontrar materiales metamórficos, granitos del Paleozoico y materiales terciarios y, 2) la parte llana de la ciudad, donde se pueden distinguir el Cuaternario antiguo, fundamentalmente aflorante en la zona central de la ciudad, y el Cuaternario reciente, en los depósitos deltaicos de los ríos Besòs y Llobregat. A continuación se describen estas dos unidades geomorfológicas (Cid, 1998).

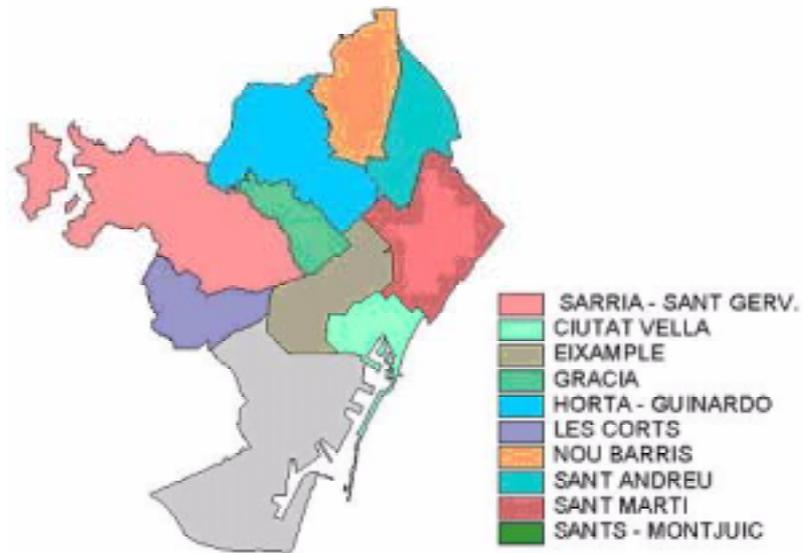


Figura 10.2. Distribución de los 10 distritos de la ciudad de Barcelona.

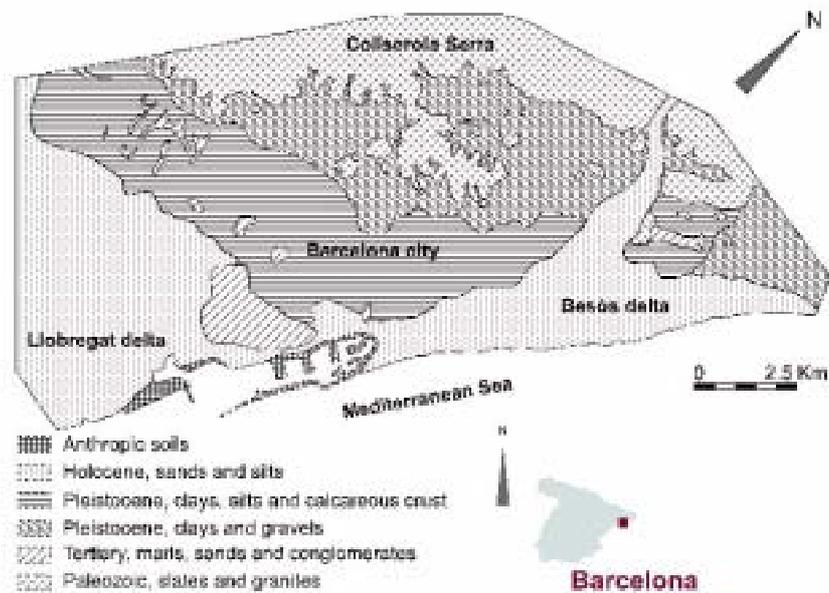


Figura 10.3. Mapa Geológico de la región de Barcelona (Cid et al., 2001).

El substrato

Constituye el basamento de la ciudad de Barcelona, que aflora en determinados lugares y, constituye los terrenos montañosos; entre los cuales es posible distinguir materiales graníticos, metamórficos y terciarios.

Los granitos afloran en toda la vertiente Sur del macizo del Tibidabo y en los relieves situados al NW de Badalona. Frecuentemente la parte superficial se encuentra en forma de "sauló", producto de una descomposición química debida al clima de la zona y, constituye el substrato rocoso en las zonas de Horta y Sarrià.

Los materiales metamórficos paleozoicos básicamente están formados por pizarras, calizas en menor proporción e intercalaciones de cuarcitas, areniscas metamórficas, etc. La mayor parte de los relieves del Collserola y de los Serrats de la Rovira, así como diferentes afloramientos aislados, pertenecen a este tipo de materiales.

En cuanto a los materiales del Terciario, éstos se disponen discordantemente sobre los materiales descritos anteriormente y se distinguen dos períodos geológicos:

1. Mioceno: formado por una potente serie marina de aguas poco profundas en las que se intercalan bancos de margas azuladas fosilíferas, areniscas rojizo-grisáceas y algún nivel de microconglomerados.
2. Plioceno: formado por un tramo inferior, con margas azulverdosas y numerosos fósiles y, un tramo superior con margas arenosas y arenas oscuro amarillentas. Constituye el substrato del Cuaternario en la zona central de l'Eixample y, en la parte baja de la ciudad, llegando a aflorar en diversos puntos como por ejemplo en la Catedral (Candela, 1983).

Cuaternario

Prácticamente la totalidad de los materiales del llano de Barcelona son de esta era. Se distinguen básicamente dos tipos:

1. **Cuaternario antiguo:** más conocido como "Triciclo", que se dispone discordantemente sobre un sustrato rocoso. La potencia de los materiales que lo conforman es muy variable, oscilando entre los 15 y los 25 metros, aunque en algunos puntos llega a los 35 metros. La alternancia litológica que se presenta en un ciclo de estos materiales, desde la base hasta el techo, es la siguiente: 1) arcillas rojas compactas, 2) limos amarillentos de origen eólico y 3) una costra calcárea generalmente de unos 20 a 30 cm de espesor (Cid, 1998).
2. **Cuaternario reciente:** siguiendo los diferentes trazados longitudinales de las rieras y torrentes que atraviesan el llano de Barcelona, podemos encontrar depósitos de arenas y gravas fluviales, prácticamente actuales y, materiales recientes de rellenos antrópicos. Los niveles cuaternarios recientes de mayor extensión, son los que configuran los deltas del Bessòs y del Llobregat (LOSAN, 1978).

10.3 La amenaza

10.3.1 Tectónica y sismicidad

El Mediterráneo occidental está situado en una zona de colisión entre las placas tectónicas Europea y Africana. La tasa de convergencia es moderada y, por lo tanto, los terremotos, que son el resultado de este movimiento, se producen afortunadamente con poca frecuencia.

La ciudad de Barcelona se sitúa en el nororiente de la Península Ibérica. Su nivel de amenaza sísmica se caracteriza a partir de la evaluación realizada para Cataluña. Esta región, tiene una sismicidad moderada y presenta deformaciones tectónicas débiles, si se comparan con los de otros países de la región, como por ejemplo Grecia o Italia. Adicionalmente, no se conoce exactamente, la localización o existencia de fallas activas, por lo tanto, las fuentes sísmicas están definidas basadas en la sismicidad y en la tectónica de la región.

De acuerdo a los estudios realizados por Giménez, (1997); Fleta et al. (1996); Suriñach y Roca, (1985); la sismicidad de Cataluña presenta ciertas características relacionadas con el contexto geológico, representado por tres grandes unidades: los Pirineos, el sistema Mediterráneo y la Cuenca del Ebro. La mayor concentración de actividad sísmica de la región, se localiza en la zona de los Pirineos, donde han ocurrido los mayores terremotos percibidos por la comunidad. La Tabla 10.1 muestra los principales eventos históricos ocurridos en esta región. Estos terremotos fueron ampliamente sentidos en Cataluña, llegando a percibirse una intensidad máxima de VI-VII en la ciudad de Barcelona (Susana y Goula, 1998). A pesar de que, como es lógico, no se dispone de datos instrumentales de estos eventos, las descripciones de los efectos producidos, contenidas en documentos históricos de la época, han permitido estimar sus intensidades macrosísmicas (Olivera et al., 1998; Olivera et al., 1994; Banda y Correig, 1984).

Año	Intensidad máxima	Ubicación
1373	VIII y IX	Ribagorça (Pirineo central)
1427	VIII y IX	Selva, Garrotxa
1428	IX	Ripollès
1448	VIII	Vallès Oriental

Tabla 10.1. Principales sismos ocurridos en Cataluña (ICC, 2003).

En cuanto a la sismicidad de la que se dispone de datos instrumentales, a partir de 1905, los mayores sismos han sido: 1) el sismo del Valle de Arán del 19 de Noviembre de 1923, con intensidad MSK igual a VIII y 2) el sismo de la zona de Sant Celoni, pocos años después, el 12 de Marzo de 1927 con intensidad VII (Susana

y Goula, 1998). Con excepción de estos dos eventos, que produjeron daños moderados, durante el siglo XX no se han observado terremotos destructores en Cataluña, habiéndose caracterizado la sismicidad, en lo que va de siglo, por la ocurrencia de una gran cantidad de eventos sísmicos de pequeña magnitud. La sismicidad reciente de la región (1986-2000) revela que la distribución de los epicentros sigue estando presente en la zona Pirenaica y en la cadena costera, donde las deformaciones tectónicas son más importantes (ver Figura 10.4).

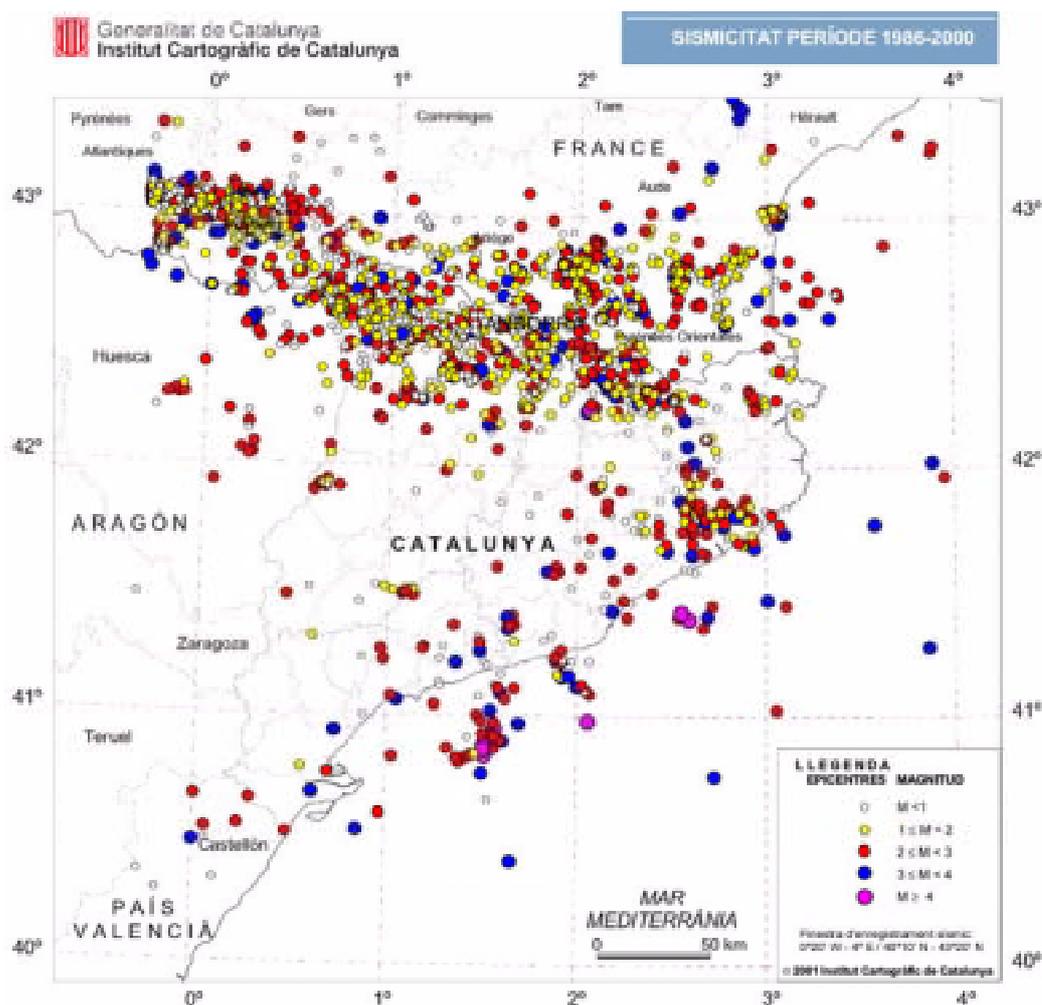


Figura 10.4. Sismicidad reciente (1986-2000) en Cataluña (ICC, 2003).

Entre los principales terremotos ocurridos en los últimos años, destacan: a) dos sismos de magnitud 4.2 que tuvieron lugar en 1994 con epicentros localizados 10 km mar adentro de la costa del Maresme, b) dos sismos en 1995 con magnitud entre 4 y 5 cuyos epicentros fueron también ubicados en el mar y, c) un sismo en 1996 de

magnitud 5.3 situado a 153 km de Barcelona, siendo éste el mayor sismo percibido últimamente. Por otra parte, como se aprecia en la Figura 10.4, se han registrado un gran número de pequeños terremotos, de magnitud inferior a 4.0, calculándose alrededor de 100 eventos por año (ICC, 2003).

10.3.2 Caracterización de la acción sísmica

Normativa de diseño NCSE-02

En la Norma Sísmica vigente NCSE-02, se define la amenaza sísmica en todo el territorio Español, en función de dos parámetros: 1) la aceleración sísmica básica a_b , que corresponde a un valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno y, 2) el coeficiente de contribución K , que tiene en cuenta la influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la amenaza sísmica de cada punto. (ver Figura 10.5).

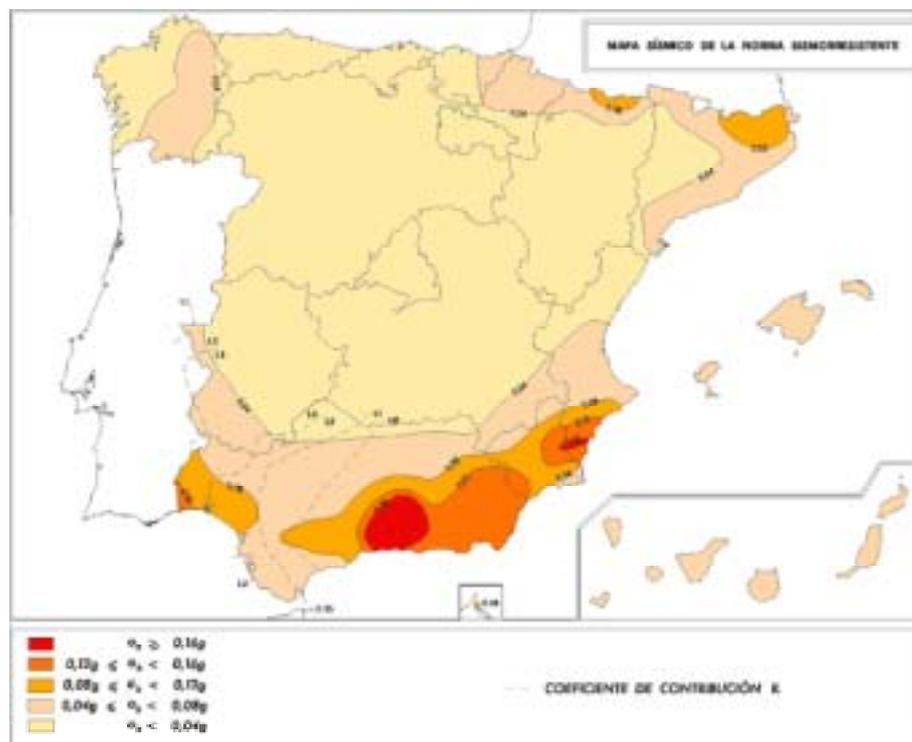


Figura 10.5. Mapa de amenaza sísmica de la NCSE-02.

Zonificación sísmica de Cataluña

Durante los últimos 10 años, el Instituto Cartográfico de Cataluña ha desarrollado una serie de estudios orientados a una definición más fina de la amenaza sísmica de Cataluña, revisando la información macrosísmica histórica y actualizando la información instrumental (Fleta et al., 1996; Secanell et al., 1998; Secanell, 1999; Goula et al., 1998; Cid, 1998; Cid et al., 2001).

Secanell (1999) efectúa el análisis detallado del peligro o amenaza sísmica de Cataluña y considera también los efectos de amplificación causados por la geología local.

Cid (1998) efectúa un análisis detallado de la zonificación sísmica de los suelos de la ciudad de Barcelona. El esquema simplificado final que propone Cid (1998) clasifica los suelos de la ciudad en 4 tipos correspondientes a 4 grandes zonas (ver Figura 10.6), cuya descripción se da a continuación:

- Roca: afloramientos paleozoicos y terciarios, no se esperan efectos de amplificación.
- 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. La amplificación de la aceleración máxima del suelo PGA, respecto de la roca es 1.7.
- 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. La amplificación de la aceleración máxima del suelo respecto a la roca es 1.65.
- 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. La amplificación de la aceleración máxima del suelo respecto a la roca es 1.4.

Más recientemente, la sección de sismología del Instituto Cartográfico de Cataluña ha reevaluado la amenaza sísmica en la ciudad de Barcelona. El análisis se ha efectuado considerando el tamaño de la acción en términos de la intensidad y en términos de las aceleraciones espectrales para los períodos de 0, 0.3, 0.6, 1.0 y 2.0 s. Los primeros permiten aplicar métodos de evaluación del daño basados en la intensidad, mientras que los segundos permiten avanzar en métodos basados en el desempeño y la fragilidad de los edificios.

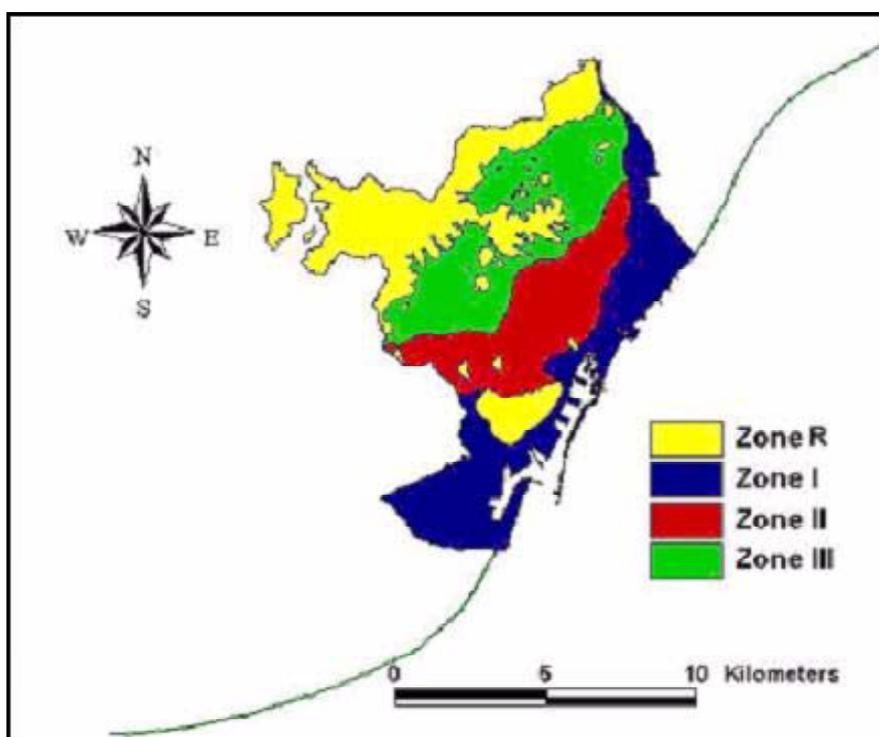


Figura 10.6. Zonificación sísmica de Barcelona - Efectos locales (Cid et al., 2001).

En ambos casos, se ha abordado el problema de la amenaza desde una óptica determinista y desde una óptica probabilista. El escenario sísmico determinista evalúa el mayor sismo que es razonable esperar que ocurra en la ciudad, mientras que uno de los escenarios sísmicos probabilistas más frecuentemente utilizados, es aquel que corresponde al terremoto cuya probabilidad de ocurrencia es del 10 % en un período de 50 años, o en términos de intervalos de recurrencia, es aquel escenario sísmico cuyo período de retorno es de 475 años.

Los detalles sobre los métodos y simplificaciones adoptadas así como los principales resultados obtenidos, pueden hallarse en diversos informes elaborados por el ICC, el más reciente de los cuales (Irizarry et al., 2003) contiene parte de los resultados obtenidos y una propuesta de espectros de respuesta para el caso determinista y probabilista.

Para crear los mapas de amenaza sísmica a partir de la metodología determinista, se utilizaron los máximos sismos históricos que han afectado la ciudad de Barcelona. En el caso de la metodología probabilista, los mapas en términos de la aceleración espectral, se crearon a partir de las leyes de atenuación propuestas por Ambraseys et al., (1996), las cuales fueron validadas a partir de los datos de aceleraciones máximas del terreno registradas en Cataluña. Se utilizó el programa CRISIS 99 para calcular la amenaza sísmica, con base en la zonificación sismotectónica realizada por Secanell (1999). Para mejorar la exactitud de los resultados, se realizó un

análisis de sensibilidad. En cuanto a los efectos locales, éstos se incluyeron en ambas metodologías, por medio de factores de amplificación espectral. Estos factores son calculados a partir de los datos de las funciones de transferencia propuestas por Cid et al., (2001) y, se comparan con las amplificaciones recomendadas por el Eurocódigo 8 y registros de sismos reales similares.

La Figura 10.7 muestra los resultados obtenidos con la metodología determinista en forma de mapas de amenaza sísmica en función de la intensidad y de los valores de aceleración espectral para períodos de 0.0, 0.3, 0.6, 1.0 y 2.0 segundos, respectivamente. Mapas análogos, obtenidos con la metodología probabilista, se muestran en la Figuras 10.8.

10.4 Demanda sísmica

La mayor parte del territorio español, no está localizado en una zona de alta sismicidad; sin embargo, los sismos que ocurrieron en el pasado en algunas zonas del país, produjeron daños considerables a las estructuras y ocasionaron un gran número de pérdidas de vidas humanas. Uno de estos sismos tuvo lugar en la zona de Andalucía en 1884, dejando más de 17.000 edificios afectados y 10.000 víctimas mortales (Barbat y Paz, 1994).

Aunque la necesidad de un código de diseño sismorresistente en España era ampliamente reconocida, no hubo ninguna regulación legal para la construcción, hasta el año 1963. El primer grupo de regulaciones que contenía una definición de la acción sísmica, Norma M.V. 101-1962, se aprobó como ley en el año 1963. Esta norma se limitó a definir la metodología para el cálculo de las fuerzas sísmicas y otras acciones, que debían ser consideradas en el diseño de las estructuras. En 1962, una comisión interministerial inició el desarrollo de un código sísmico general para España, P.G.S.-1 (1968), el cual fue aprobado en 1969 por la presidencia del gobierno. Este código incluyó un mapa de amenaza sísmica para todo el territorio Español. Aunque el P.G.S.-1 de 1968 fue aprobado como código provisional, éste permaneció en uso hasta 1974, cuando fue adoptada una versión modificada, P.D.S.-1, con aplicación exclusiva a edificios (Barbat y Paz, 1994).

En 1994 fue aprobada la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-94), cuya finalidad era la de evitar las pérdidas de vidas humanas y reducir el coste económico que futuros terremotos pudieran ocasionar. Esta norma estuvo vigente hasta octubre del 2002, fecha en la cual comenzó a regir la nueva Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02). Esta última normativa mantiene la finalidad de la anterior, pero incorpora nuevos criterios y sugerencias extraídas de las lecciones aprendidas en los últimos grandes terremotos destructores (Chile 1985, México 1985, Armenia 1988, Loma Prieta 1989, Kobe 1995, Izmit 1999 y Taiwán 1999). Se han tenido en cuenta las directrices Europeas en materia de construcción sismorresistente, haciendo compatible la nueva norma con el Eurocódigo. La

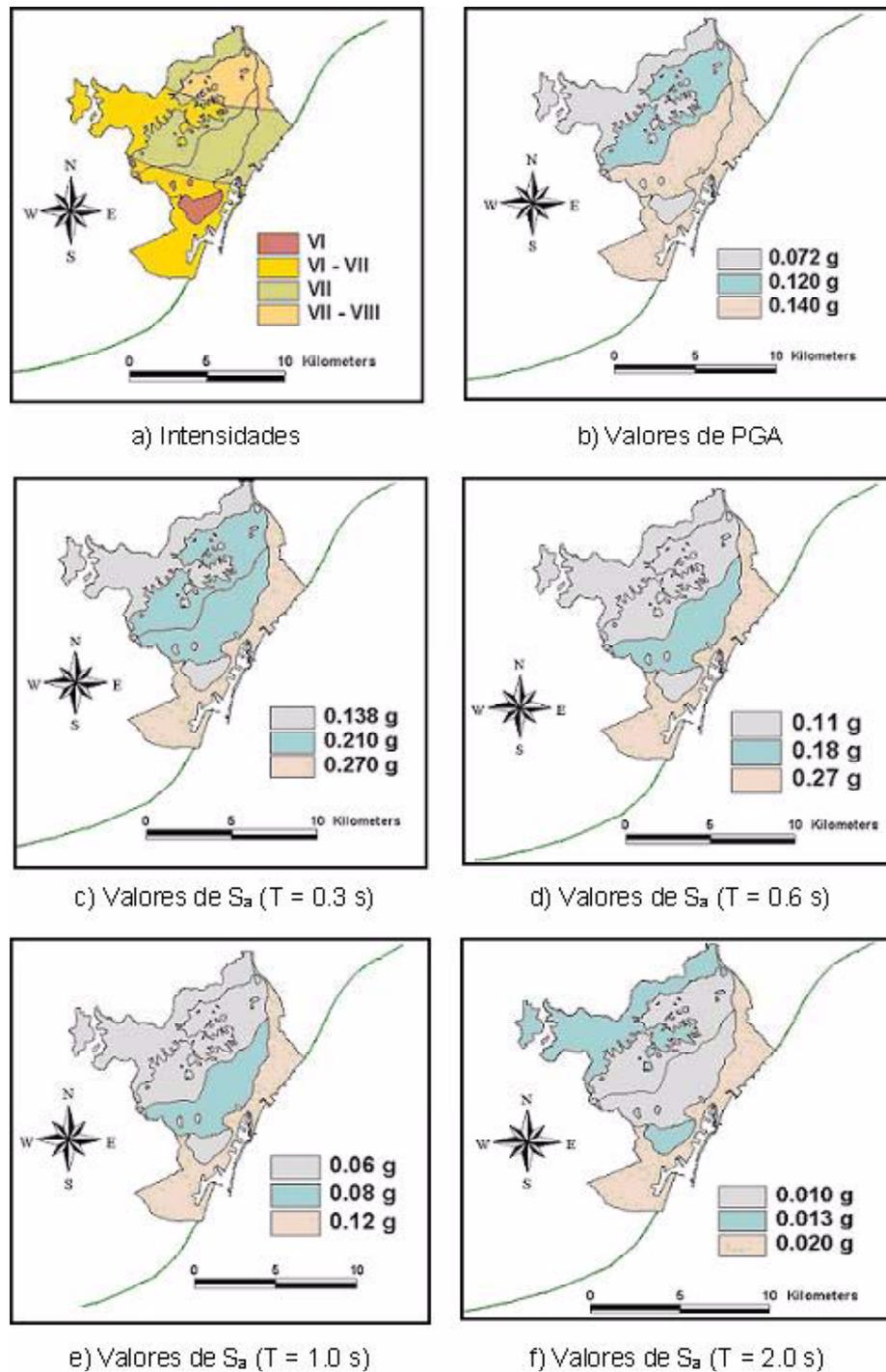


Figura 10.7. Escenario sísmico determinista para Barcelona. El escenario tiene en cuenta los efectos de suelo y tiene el significado del mayor sismo esperado en Barcelona (Irizarry et al., 2003).

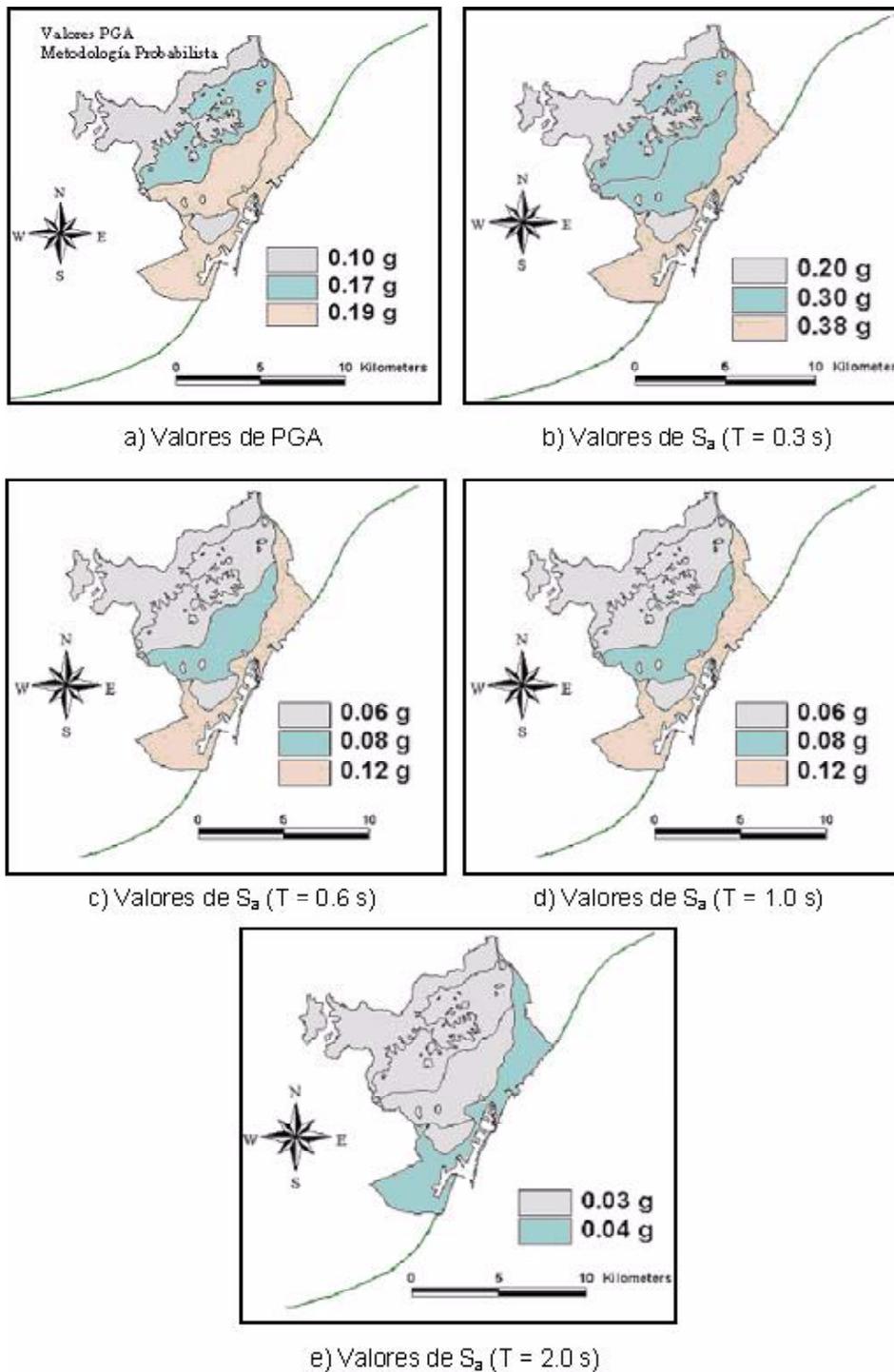


Figura 10.8. Escenario sísmico probabilista para Barcelona. El escenario tiene en cuenta los efectos de suelo y expresa niveles de PGA y valores de aceleración espectral para diferentes períodos con una probabilidad de ocurrencia del 10 % en 50 años, o con un período de retorno de 475 años (Irizarry et al., 2003).

NCSE-02 establece un período transitorio de 5 años durante los cuales su aplicación es opcional, pudiéndose seguir aplicando la NCSE-94.

La aplicación de la NCSE-94 no era obligatoria para las construcciones de moderada importancia y, en construcciones donde la aceleración sísmica de cálculo, fuera inferior a $0.06 g$. Con la nueva normativa NCSE-02, se ha bajado este límite a $0.04 g$. De acuerdo al mapa de amenaza sísmica del territorio Nacional incluido en esta normativa, Barcelona se encuentra situada en una zona de actividad sísmica moderada, con una aceleración sísmica de cálculo igual a $0.04 g$ y $0.052 g$ para estructuras con un período de vida igual a 50 y 100 años, respectivamente. La mayoría de los edificios son diseñados para un período de vida útil de 50 años, por lo tanto, de acuerdo a la NCSE-94, en Barcelona no era necesario aplicar esta normativa. Con la reducción del valor límite de aceleración hasta $0.04 g$, incluido en la NCSE-02, actualmente es necesario considerar la acción sísmica para el diseño de estructuras en la ciudad de Barcelona, pero no será estrictamente obligatorio hasta el 2007, es decir, una vez transcurrido un período transitorio de 5 años.

Los mapas de amenaza sísmica han sufrido cambios significativos entre la normativa P.D.S-1 (1974) y la NCSE-02 (2002), que pueden influir considerablemente a la hora de definir las condiciones para la aplicación de la normativa para el diseño de estructuras. Uno de los principales cambios en el mapa de amenaza, está en el parámetro utilizado para definir la acción sísmica. Mientras la P.D.S-1 utilizaba la escala de intensidades MSK, la NCSE-94 y NCSE-02 utilizan la aceleración sísmica básica (a_b) máxima. Este parámetro define un valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno, correspondiente a un período de retorno de quinientos años. Con la NCSE-94, la ciudad de Barcelona pasó de ser una zona con un grado de intensidad de VII a un grado de intensidad VI en la escala MSK. La causa de este cambio, es que el cálculo de la amenaza sísmica actual, se ha realizado en términos de intensidad MSK, a partir de los datos actualizados existentes en el catálogo sísmico del Instituto Geográfico Nacional. Para determinar la aceleración horizontal característica a partir de la intensidad MSK, la misma norma da la siguiente correlación:

$$\text{Log}_{10} a = 0.30103 I - 0.2321 \quad (10.1)$$

donde a viene expresada en gals ($10^{-2} m/s^2$).

El reciente informe de Irizarry et al. (2003) contiene también una propuesta para la definición de la demanda sísmica en Barcelona, en términos de espectros de respuesta para el caso determinista y probabilista, los cuales se describen más adelante en esta sección.

Espectro NCSE-02

La forma del espectro elástico de aceleraciones, para un coeficiente de amortiguamiento crítico del cinco por ciento (5 %), propuesta en la NCSE-02, se define por

medio de la siguiente expresión:

$$\alpha(T) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 + 1.5 \cdot \frac{T}{T_B} & T < T_B \\ 2.5 & T_B \leq T \leq T_C \\ K \cdot \frac{C}{T} & T > T_C \end{array} \right\} \quad (10.2)$$

$\alpha(T)$ es el valor del espectro de respuesta normalizado, T es el período propio del oscilador en segundos, K es el coeficiente de contribución, que se encuentra tabulado para cada ciudad de España, C es el coeficiente de suelo, que tiene en cuenta las características geotécnicas del terreno de cimentación y T_B , T_C son los períodos característicos del espectro de respuesta, definidos como:

$$T_B = K \cdot \frac{C}{10} \quad (10.3)$$

$$T_C = K \cdot \frac{C}{2.5} \quad (10.4)$$

La Figura 10.9 muestra gráficamente la forma del espectro elástico propuesto por la NCSE-02.

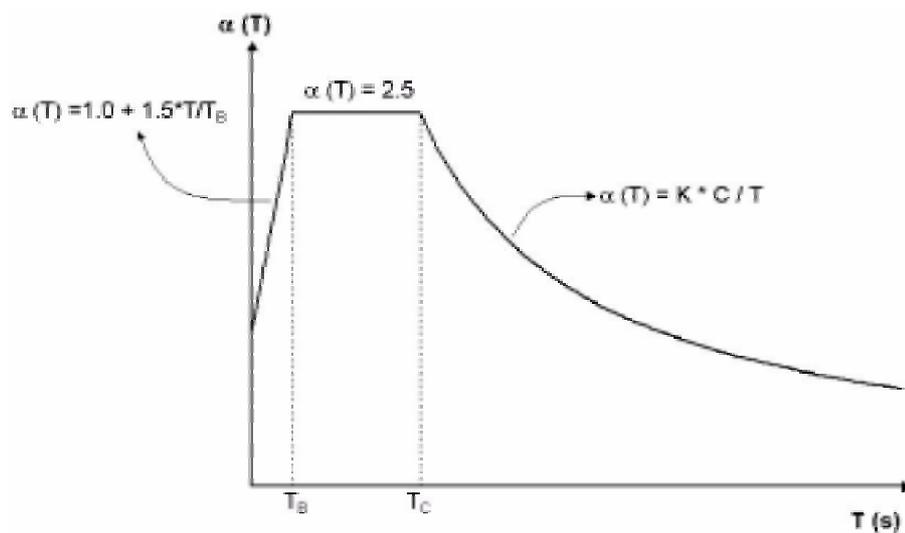


Figura 10.9. Esquema del espectro elástico de respuesta normalizado propuesto por la NCSE-02 (amortiguamiento de 5%).

Coefficiente de suelo: Los suelos se clasifican en los siguientes tipos:

- Tipo I: roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $V_S > 750 \text{ m/s}$.
- Tipo II: roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $400 \text{ m/s} < V_S \leq 750 \text{ m/s}$.
- Tipo III: suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $200 \text{ m/s} < V_S \leq 400 \text{ m/s}$.
- Tipo IV: suelo granular suelto, o cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $V_S \leq 200 \text{ m/s}$.

A cada uno de estos tipos de suelos, se le asigna el valor del coeficiente C indicado en la Tabla 10.2.

Tipo de suelo	Coefficiente C
<i>I</i>	1.0
<i>II</i>	1.3
<i>III</i>	1.6
<i>IV</i>	2.0

Tabla 10.2. Valores del coeficiente del terreno C .

Para obtener el coeficiente C de cálculo, se determinan los espesores e_1, e_2, e_3 y e_4 de los suelos tipo *I, II, III, IV* respectivamente, existentes en los 30 primeros metros bajo la superficie. Se adopta como valor de C , el valor medio obtenido al ponderar los coeficientes C_i de cada estrato con su espesor e_i (en metros) mediante la siguiente ecuación:

$$C = \sum \frac{C_i \cdot e_i}{30} \quad (10.5)$$

En los edificios con sótanos bajo el nivel general de la superficie del terreno, los espesores de las distintas capas para clasificar las condiciones de cimentación, deben normalmente medirse a partir de la rasante. En aquellos casos especiales en que resulte $C > 1.8$, el espectro de respuesta definido con las reglas anteriores, puede no ser aplicable a las construcciones con un período fundamental mayor de T_C . En este caso, para $T > T_C$ se tomará $\alpha(T) = 2.5$, a menos que se determine un espectro

de respuesta específico del emplazamiento, cuyas ordenadas en ningún caso serán inferiores a las que se obtendrían con la ecuación (10.2).

Para obtener el espectro de diseño, es necesario multiplicar los valores del espectro elástico de respuesta normalizado, por el valor de la aceleración sísmica de cálculo a_c , que se define como:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b \quad (10.6)$$

a_b : es la aceleración sísmica básica, que se obtiene directamente del mapa de amenaza sísmica (ver Figura 10.5).

ρ : coeficiente adimensional de riesgo, función de la probabilidad aceptable de que se exceda a_c en el período de vida para el que se proyecta la construcción esto es:

$$\rho = \left\{ \begin{array}{ll} 1.0 & \text{construcciones de importancia normal} \\ 1.3 & \text{construcciones de importancia especial} \end{array} \right\} \quad (10.7)$$

S : coeficiente de amplificación del terreno, definido como:

$$S = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{C}{1.25} & \rho \cdot a_b \leq 0.1 g \\ \frac{C}{1.25} + 3.33 \left(\rho \cdot \frac{a_b}{g} - 0.1 \right) \left(1 - \frac{C}{1.25} \right) & 0.1 g < \rho \cdot a_b < 0.4 g \\ 1.0 & \rho \cdot a_b \geq 0.4 g \end{array} \right\} \quad (10.8)$$

donde C es el coeficiente de suelo.

La Figura 10.10 muestra el espectro de diseño propuesto por la NCSE-02 para la ciudad de Barcelona en formato AD (Aceleración-Desplazamiento), para una construcción de importancia normal ($\rho = 1.0$) y un suelo tipo II ($C = 1.3$).

Espectros propuestos por el ICC

El ICC propone, a partir de las dos metodologías de evaluación de la amenaza sísmica de la ciudad de Barcelona, la determinista y la probabilista, una formulación analítica para el espectro de aceleración. A partir del trabajo realizado por Lagomarsino et al. (2002), se obtiene la siguiente expresión que define el espectro elástico:

$$S_a(T) = \left\{ \begin{array}{ll} PGA \left[1 + \frac{T}{T_B} (B_C - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_B \\ PGA * B_C & T_B \leq T \leq T_C \\ PGA * \left[\frac{T_C}{T} \right]^d B_C & T_C \leq T \leq T_D \\ PGA * \left[\frac{T_D}{T} \right]^2 B_C & T \geq T_D \end{array} \right\} \quad (10.9)$$

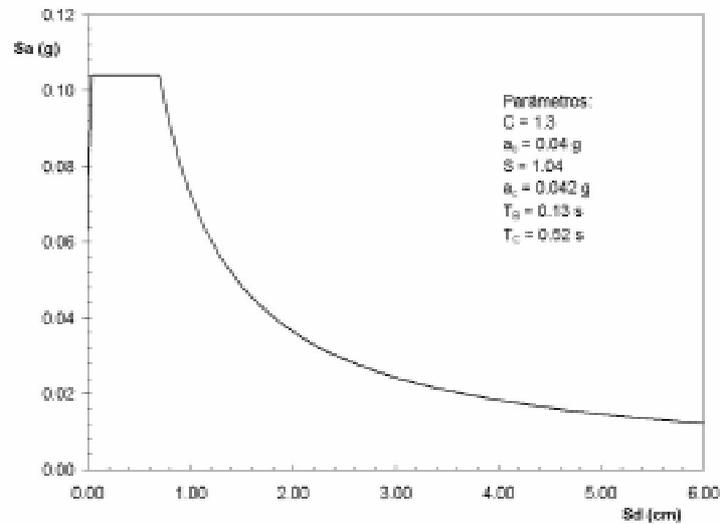


Figura 10.10. Espectro de diseño de la NCSE-02 en formato AD.

$S_a(T)$: es la ordenada del espectro de respuesta elástico.

T : período de vibración de un sistema de un solo grado de libertad.

PGA : es la aceleración máxima del terreno.

B_C : factor que relaciona la máxima aceleración espectral $S_{a,max}$ con la aceleración máxima del terreno PGA , esto es:

$$B_C = \frac{S_{a,max}}{PGA} \quad (10.10)$$

T_B y T_C : límite inferior y superior de los períodos de la zona del espectro de aceleración constante, respectivamente.

d : exponente variable de la función que controla la zona de velocidad constante, definido como:

$$d = -\frac{\log \left[\frac{B_D}{B_C} \right]}{\log \left[\frac{T_D}{T_C} \right]} \quad (10.11)$$

T_D : período a partir del cual comienza la zona de desplazamiento constante del espectro de respuesta.

B_D : factor que relaciona el valor de la aceleración espectral para el período T_D con la aceleración máxima del terreno PGA , esto es:

$$B_D = \frac{S_a(T_D)}{PGA} \quad (10.12)$$

Para las 4 zonas definidas por Cid (1998) mostradas en la Figura 10.6, se variaron los diferentes parámetros de esta formulación, para obtener el grupo de parámetros que mejor ajustan los espectros de respuesta de aceleración determinista y probabilista, obtenidos a partir del análisis de la amenaza sísmica (ver Tabla 10.3).

Zona	Parámetros	Probabilista	Determinista
I	$PGA (g)$	0.188	0.136
	T_B	0.10	0.10
	T_C	0.40	0.39
	B_C	2.00	1.91
	d	1.34	1.70
	T_D	2.85	2.30
II	$PGA (g)$	0.194	0.141
	T_B	0.10	0.10
	T_C	0.23	0.22
	B_C	2.50	2.45
	d	1.28	1.43
	T_D	2.21	2.20
III	$PGA (g)$	0.169	0.122
	T_B	0.10	0.10
	T_C	0.19	0.22
	B_C	2.57	2.29
	d	1.12	1.40
	T_D	1.77	2.00
Roca	$PGA (g)$	0.100	0.072
	T_B	0.10	0.10
	T_C	0.25	0.23
	B_C	2.29	2.26
	d	0.98	1.12
	T_D	1.75	1.75

Tabla 10.3. Parámetros para el espectro probabilista y determinista propuesto por el ICC para la ciudad de Barcelona (Irizarry et al., 2003).

De acuerdo al estudio de zonificación sísmica realizado por Cid (1998), la zona del Eixample se encuentra localizada en la zona II, por lo tanto, utilizando los respectivos parámetros de la Tabla 10.3, se obtienen los espectros correspondientes a los escenarios determinista y probabilista, que representan la demanda sísmica para esta zona de la ciudad. La Figura 10.11 muestra estos espectros en formato AD.

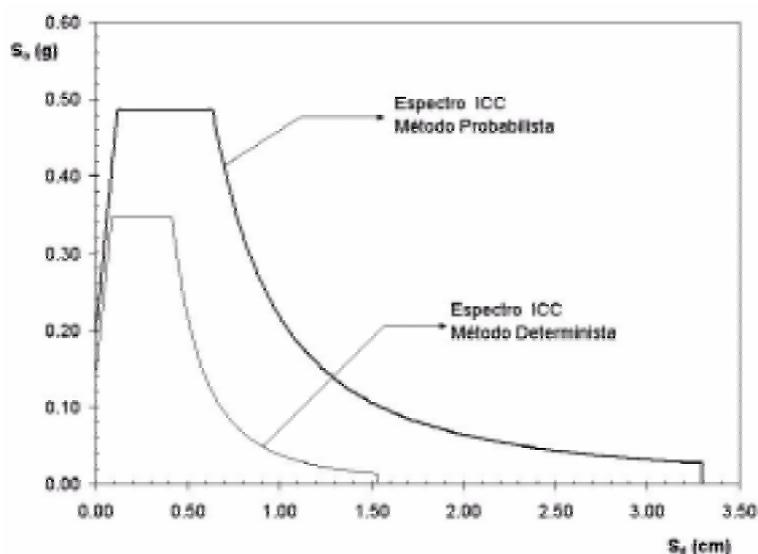


Figura 10.11. Espectros de respuesta propuestos por el ICC para los escenarios determinista y probabilista (Irizarry et al., 2003).

10.5 Resumen y Discusión

La ciudad de Barcelona es, por tamaño e importancia, la segunda ciudad de España. Se encuentra localizada en una zona de sismicidad moderada, caracterizada por la ocurrencia de una gran cantidad de eventos de baja magnitud e intensidades máximas que varían entre VI y VII en la escala MSK.

Durante los últimos años, se han desarrollado varios estudios para definir la amenaza sísmica de Cataluña, a partir de los cuales, se han identificado cuatro zonas en la ciudad de Barcelona, que permiten clasificar las diferentes tipos de suelo de acuerdo a los efectos de amplificación causados por las condiciones geológicas locales.

Recientemente, la sección de sismología del Instituto Cartográfico de Cataluña ha reevaluado la amenaza sísmica de la ciudad de Barcelona, en términos de intensidad y aceleraciones espectrales para los períodos de 0, 0.3, 0.6, 1.0 y 2.0 s. En ambos casos se han abordado los casos determinista y probabilista.

La demanda sísmica en la ciudad de Barcelona, para efectos de evaluación del desempeño sísmico de las estructuras existentes, se representa por dos tipos de espectros: el primero de ellos, corresponde al espectro de diseño propuesto por la nueva Normativa de Construcciones Sismorresistentes NCSE-02, definido por los períodos característicos de las zonas típicas de un espectro suavizado y por los factores de suelo e importancia de la estructura. El segundo tipo, corresponde a los espectros de respuesta suavizados propuestos por el Instituto Cartográfico de Cataluña, para los casos determinista y probabilista de la amenaza sísmica de la

ciudad. Estos dos tipos de representación, muestran diferencias considerables tanto en los niveles máximos de aceleración del terreno (PGA) como en la rama que representa la zona de velocidad constante, siendo mucho más pronunciada en el caso de los espectros propuestos por el ICC.