63145
III

Instituto Geológico y Minero de España

Región de Murcia
Consejería de Obras Públicas y Ordenación de Territorio

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y ESTUDIO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA Y POR INUNDACIONES DE LA CIUDAD DE CARTAGENA
MAPAS A ESCALA 1:15.000

Tomo II

PELIGROSIDAD SÍSMICA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA

MEMORIA

2000

PELIGROSIDAD SÍSMICA DE CARTAGENA

CARTOGRAFÍA DE ZONACIÓN SÍSMICO-GEOTÉCNICA
VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS

INDICE

1. INTRODUCCIÓN 1

2. NEOTECTÓNICA 3
- 2.1. Encuadre regional 3
- 2.2. Principales estructuras neotectónicas 4
- 2.3. Movimientos de las fallas neotectónicas 5
- 2.4. Áreas de interés neotectónico 6

3. SISMICIDAD Y ZONAS SISMOGENÉTICAS 7
- 3.1. Sismicidad histórica 7
- 3.2. Zonas sismogenéticas 9
- 3.3. Parámetros sísmicos de las zonas sismgenéticas 11

4. PELIGROSIDAD SÍSMICA 18
- 4.1. Antecedentes 18
- 4.2. Análisis determinista 19
- 4.3. Análisis probabilista 21
- 4.4. Selección de terremotos característicos 26

5. PARAMETROS SISMICOS CARACTERISTICOS Y ESPECTROS DE RESPUESTA DE LOS TERREMOTOS 28
- 5.1. Introducción 28
- 5.2. Hipótesis consideradas en el estudio 28
- 5.3. Estimación de la magnitud 29
- 5.4. Duración 30
- 5.5. Aceleración máxima 31
- 5.6. Espectros de respuesta 32

6. ZONACIÓN SÍSMICA DE CARTAGENA 38
- 6.1. Introducción 38
- 6.2. Zonación sísmico-geotécnica del área urbana de cartagena 38
- 6.3. Amplificación sísmica en función del tipo de suelos 39

7. VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS 48
7.1. Introducción 48
7.2. Cartografía de respuesta sísmica aplicada a la edificación 49
7.3. Ejemplo de aplicación de la cartografía de respuesta sísmica 51

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53

ANEXO 1: Mapa neotectónico regional

ANEXO 2: Zonación sismogenética regional

1. INTRODUCCIÓN

Los terremotos son los fenómenos naturales que mayor número de víctimas y daños ocasionan a nivel mundial, con una distribución geográfica que abarca gran parte del Planeta y con una recurrencia más o menos periódica. A pesar de los esfuerzos por intentar predecirlos, aún se está lejos de tal posibilidad y hoy día la única forma de luchar contra sus efectos es la prevención, en su más amplio sentido.

El terremoto de Mula (Murcia) de Febrero de 1999, de Intensidad VI-VII y Magnitud 5, ha puesto de manifiesto la actividad sísmica de la región entorno a la zona de Cartagena, produciendo daños en muchas edificaciones de una amplia zona alrededor del epicentro.

En caso de un terremoto las ciudades sufren de forma especial sus efectos, pues se acumulan múltiples circunstancias que agravan los daños. Para llegar a afrontar con eficacia las consecuencias de un terremoto y evitar al máximo los daños, se debe partir del conocimiento de la actividad sísmica, es decir, cuál es la peligrosidad sísmica de la ciudad (probabilidad de que ocurra un terremoto de intensidad o magnitud determinada en un período de tiempo dado).

La determinación de la peligrosidad sísmica define el terremoto más probable para un período de tiempo dado. Pueden darse varias opciones: o bien se eligen determinados períodos de retorno, generalmente 100, 500 y 1000 años, y se calcula el terremoto más probable, o bien se puede fijar un período de referencia, por ejemplo 100 años, y se calculan las probabilidades de que ocurra en este período los terremotos posibles, de acuerdo con las condiciones sismotectónicas de la región.

Para dar respuesta a estas cuestiones es necesario conocer cuales son las fuentes sísmicas, es decir las estructuras geológicas causantes de los terremotos: las fallas. También es necesario estudiar la sismicidad de dicha región, tipo de terremotos, sismicidad histórica, localización, etc.

Conocida la peligrosidad sísmica, los efectos sobre la ciudad dependerán del tipo de terreno y sus propiedades (resistencia, nivel freático, composición litológica, etc) y, por

último, de las condiciones constructivas de las edificaciones y demás infraestructuras (tipo de construcción, altura, cimentación, etc). Estos aspectos responden a los conceptos de riesgo y vulnerabilidad.

Los estudios necesarios para poder desarrollar estas cuestiones básicas requieren efectuar una serie de trabajos de tipo geológico, sísmico, geotécnico, de evaluación de la vulnerabilidad, etc, que se basan en datos obtenidos a partir de investigaciones como:

- Actividad de las fallas
- Relación entre fallas y terremotos
- Sismicidad histórica de la región
- Propiedades geotécnicas del terreno
- Condiciones de construcción de edificios e infraestructuras, etc.

2. NEOTECTÓNICA

La Región de estudio esta integrada en su mayor parte en las Cordilleras Béticas. Estas Cordilleras junto con el Rift comprenden cadenas de plegamiento alpino, que se extienden al Sur de la Península Ibérica y Marruecos y que forman parte del sistema de cadenas alpinas que rodean al Mediterráneo Occidental. El área Norte pertenece al Macizo Ibérico. Debido a que la peligrosidad natural de la ciudad de Cartagena esta íntimamente asociada a las cordilleras Béticas, el estudio se centrará a la Neotectónica de dicho dominio regional.

2.1. Encuadre neotéctonico regional

La actividad neotéctonica en la región de Murcia se considera que comienza hace 11-12 millones de años. La primera actividad de este tipo se situa en el Tortoniense Superior y se manifiesta porque la compresión de dirección WNW-ESE dominante pasa a ser de dirección NW-SE, NNW-SSE, llegando a ser N-S durante el Plioceno Superior y el Cuaternario, en consonancia con la compresión entre las placas Ibérica y Africana. Debido a esto las fallas de dirección N60º-70ºE se paralizan, o funcionan como inversas, y si la compresión es N-S actúan como fallas de desgarre sinistras (Noreste de Coy, SurSuroeste de Bullas, aledaños de Archena).

Durante el Mioceno Superior las fallas de dirección E-W mantienen movimientos de desgarre dextrales (ligeramente amortiguadas). Las fallas de dirección WNW-ESE prosiguen con menor dificultad de movimientos (falla de Socovos).

A partir del Plioceno son las fallas de dirección NW-SE y las NNE-SSW las que tienen importantes movimientos (corredores Puerto Lumbreras-Murcia y Guadalentin-Bajo Segura). Se produce una compresión de dirección NNW-SSE, y una tensión E-W. Las fallas NW-SE y NE-SW a NNE-SSW presentan movimientos de desgarre, dextrales y sinestrales respectivamente y en ocasiones oblicuas o incluso normales.

Dentro del periodo Neotéctonico se produce un levantamiento desde el Tortoniense Superior. El resultado del mismo es una extensión radial en los movimientos descritos anteriormente y algunas fallas presentan movimientos verticales importantes.

Es patente que la región de Murcia situada al Sur del accidente de Alhama, está dentro del corredor de desgarre del SE de España. Desde el accidente de Alhama al de Socovos, la región tiene un sistema de desgarre claro. Al Norte disminuye el sistema de desgarre y se adapta al movimiento geodinámico general.

2.2. Principales estructuras neotéctonicas

Las estructuras más importantes cercanas a la ciudad de Cartagena tienen prolongaciones desde la región de Murcia a las provincias de Almería, Alicante, Granada y Jaén, donde cambian localmente sus nombres. Las principales estructuras que aparecen son los pliegues y las fallas:

Los pliegues suelen aparecer subordinados a las fallas y ambos se forman por el sistema de esfuerzos existente. En las zonas externas de las Cordilleras Béticas próximas a Cartagena se pueden observar pliegues de escala métrica a cartográfica en los materiales de relleno de las cuencas. A lo largo de la falla de Bullas-Archena aparecen terrazas y travertinos plegados, sinclinales volcados en el Mioceno Superior (Sur de la Sierra de Ricote, SE de Macisbenda, sur del Pico Madroños) y anticlinales más o menos fallados (Cápres, Sierra de la Espada). También se pueden citar la estructura de Caravaca, Mula y Fortuna.

Tanto en las zonas internas como externas de las Cordilleras Béticas los sistemas de fallas más importantes son tres y tienen direcciones NE-SW a NNE-SW, E-W a N60ºE y NW-SE. Además existen fallas de dirección N-S de menor importancia.

El juego de dirección NE-SW a NNE-SSW es el más importante. Cabe destacar la falla de Lorca-Alhama de Murcia, que pasa hacia Alicante por Orihuela, y la falla de Palomares (Almería), así como su continuación hacia el Norte por el Oeste de las sierras de Almagrera y Almenara, prolongándose bajo sedimentos cuaternarios hasta el borde occidental de la Sierra de Carrascoy y pasando por Alicante. Estas fallas no son una única superficie sino que forman un enjambre, que forman una estrecha banda subsidente, a modo de fosa tectónica compleja (fosa del Guadalentín). La complejidad de la fosa no es tan sólo por la cantidad de superficies de fallas de la dirección descrita sino por que hay otro juego de dirección NW-SE,

que subdividen las anteriores, creando sectores de subsidencias diferenciales, con espesores de relleno Neógeno y Cuaternario muy variables. Este conjunto de fosas comenzó su actividad en el Tortoniense Superior y son activas en la actualidad.

Las fallas de dirección NW-SE son de menor importancia en las zonas Internas de las Cordilleras Béticas. En las zonas externas cobran mayor protagonismo y se encuentran fallas como las del corredor del Segura Medio, las del borde NW de la cuenca de Mula y su prolongación al Norte, y la mayor parte de la cuenca de Caravaca. Hay grandes fallas de dirección ENE como la de Bullas-Archena (N60ºE), y de menor importancia como la de Yecla-Jumilla que actúan como fallas sinestrales e inversas. Cabe destacar la falla de Socovos de dirección N125ºE dextral que progresivamente se hace inversa, en su extremo oriental y va tomando dirección E-W.

En las zonas Internas, las fallas de dirección E-W son importantes, pero los movimientos de las mismas se consideran preneotéctonicos. Cabe destacar la existencia de dos zonas de falla: al Norte de los relieves de Mazarrón, Cartagena y Cabo de Palos, y al Sur pasando por las proximidades del Cabo Cope y prolongándose hacia el mar otra falla importante.

Las fallas de dirección N-S se pueden apreciar en las proximidades de Mazarron y en las cuencas de Mula y de Fortuna. Normalmente actúan como fallas normales profundas que permiten la salida de materiales volcánicos durante el periodo neotéctonico en diversas fases.

El surco de contacto entre las zonas internas y externas de las Cordilleras Béticas no tiene importancia desde el punto de vista neotéctonico, pero cabe destacar que se trata de una zona débil sometida a reajustes isostáticos.

2.3. Movimientos de las fallas neotéctonicas

En el entorno de Cartagena los movimientos subsidentes detectados por dataciones absolutas corresponden a:

- la falla W de Cabezo Gordo, de dirección N140ºE; en el Pleistoceno superior tiene tasas de movimiento vertical del orden 7,5 cm/1.000 años
- la falla de Cartagena, de dirección N140ºE; tiene tasas de 6 cm/1.000 años
- la zona deprimida de Fuente Álamo y el mar Menor, con tasas de hundimiento en el Pleistoceno Superior de 7 cm/1.000 años
- las tasas de elevación de la cuenca de Cope son de 50 cm/1.000 años desde hace 1,6 millones de años hasta hace 180.000 años, y de 5-9 cm/1.000 años en los últimos 180.000 años.

2.4. Áreas de interés neotéctonico

Se trata de regiones en los que se han producido movimientos recientes, en zonas próximas a la ciudad de Cartagena.

La Cuenca del Guadalentín-Bajo Segura o corredor de Puerto Lumbreras-Murcia, presenta una fuerte subsidencia que da lugar a gran cantidad de aspectos morfológicos característicos de zona activa.

En las zonas externas destacan las bandas de Jumilla-Yecla y Socovos-Calasparra-Cieza, así como una amplia zona a ambos lados de la falla de Bullas-Archena. Hacia el sur sobrepasa el contacto entre zonas internas y externas y enlaza con el corredor Puerto Lumbreras-Murcia. Se trata de las cuencas de Caravaca, Mula y Fortuna, separadas por el corredor del segura Medio.

El Mar Menor y la zona litoral entre Aguilas y Cabo Palos en los episodios marinos Cuaternarios presentan rasgos de actividad Neotectónica.

3. SISMICIDAD Y ZONAS SISMOGENETICAS

3.1. Sismicidad histórica

El conocimiento de la peligrosidad sísmica de un área requiere analizar las características de la actividad sísmica en la zona y en las zonas próximas en las que puedan ocurrir terremotos que la afecten.

Para este estudio se ha analizado un área con un radio máximo de 200 km alrededor de la ciudad de Cartagena. Estudios anteriores han mostrado que para la sismicidad de la Península Ibérica, la influencia de las zonas situadas a distancias superiores es despreciable.

Se han considerado todos los terremotos dentro de la citada área incluidos en el Catálogo Sísmico del Instituto Geográfico Nacional, hasta el 10 de Enero de 1999. A pesar de que los recientes terremotos de Murcia no quedan incluidos en este catálogo, al haber ocurrido con posterioridad, se han considerado expresamente en este estudio. El listado contiene más de 3.000 sismos para la zona de estudio.

De la revisión del listado de terremotos se deduce que no se han registrado grandes terremotos históricos en las proximidades de Cartagena, aunque a distancias que oscilan entre 40 y 60 km sí han ocurrido terremotos importantes. Así se ha registrado 1 terremoto de intensidad X, 1 de intensidad IX, 6 de intensidad VIII y 15 de intensidad VII, todos ellos localizados a una distancia inferior a 100 km de Cartagena. En este listado se ha incluido el reciente terremoto de Mula (Murcia) de intensidad VI-VII y magnitud m_b=5.0, ocurrido el 2 de Febrero de 1999. Terremotos situados a distancias mayores respecto a Cartagena tendrán menor influencia en el cálculo de la peligrosidad sísmica.

En el Cuadro 3.1 se incluyen los terremotos importantes ocurridos próximos a la zona de estudio.

Cuadro 3.1
Terremotos históricos próximos a la zona de estudio

Terremoto				Fecha	Distancia aprox. a Cartagena (km)
Intensidad	Coordenadas		Localización		
X	-0°42′	38°00′	Torrevieja (A)	1829	52
IX	-1°52′	37°13′	Vera (Al)	1518	86
VIII	-0°38′	38°06′	Guardamar del Segura (A)	1523	64
VIII	-1°42′	37°42′	Lorca (Mu)	1579	63
VIII	-1°42′	37°42′	Lorca (Mu)	1674	63
VIII	-1°13′	38°01′	Cotillas (Mu)	1911	48
VIII	-1°12′	38°06′	Lorqui (Mu)	1911	58
VIII	-0°50′	38°05′	Jacarilla (A)	1919	54
VII	-1°42′	37°42′	Lorca (Mu)	1674	63
VII	-0°42′	38°00′	Torrevieja (A)	1802	52
VII	-1°42′	37°42′	Lorca (Mu)	1818	63
VII	-0°42′	38°00′	Torrevieja (A)	1828	52
VII	-0°42′	38°00′	Torrevieja (A)	1837	52
VII	-0°42′	38°00′	Torrevieja (A)	1866	52
VII	-1°18′	38°06′	Ceutí (Mu)	1883	62
VII	-1°13′	37°48′	Totana (Mu)	1907	30
VII	-1°18′	38°06′	Ojos (Mu)	1908	60
VII	-0°40′	38°00′	Torrevieja (A)	1909	52
VII	-0°57′	38°34′	Salinas (A)	1916	100
VII	-1°16′	38°02′	Torres de Cotillas (Mu)	1917	54
VII	-1°14′	38°04′	Lorqui (Mu)	1930	58
VII	-1°09′	38°10′	Fortuna (Mu)	1944	65
VI-VII	-1°49′	38°11′	Mula (Mu)	1999	97

3.2. Zonas sismogenéticas

Se entiende como "zona sismogenética" aquella unidad del territorio que posee unas características sísmicas y tectónicas homogéneas en donde se generan movimientos sísmicos. Desde un punto de vista tectónico pueden estar constituidos por una o varias estructuras y la génesis de terremotos se supone homogénea en el tiempo y en el espacio.

En el área de la región de Murcia se han definido 9 zonas sismogenéticas. Las zonas sismogenéticas definidas coinciden en gran medida con las grandes unidades geológico-estructurales y dominios neotectónicos de la región:

Zona 1: Cartagena-Aguilas

En ella se incluyen las áreas sismotectónicas de Águilas-Mazarrón, Campo de Cartagena y Cartagena, dentro de la provincia de Murcia. Está limitada al N por la gran falla de Lorca-Alhama de Murcia y la Sierra de Carrascoy, y al S por el Mar Mediterráneo. El límite E lo constituye el Mar Mediterráneo y la zona de Torrevieja-Alicante, caracterizada por su elevada sismicidad, y el límite W queda definido por la falla de Palomares, que da paso a la zona 8. La zona 1 corresponde a las Zonas Internas de la Cordillera Bética, destacando la presencia del Complejo Nevado-Filábride, que aparece cubierto en gran parte de su extensión por depósitos recientes.

Zona 2: Murcia

En ella se incluye el área sismotectónica de Carrascoy, en el entorno de Murcia, en la cual la sismicidad está asociada a fallas visibles de orientación NE-SW. Está limitada al N por la gran falla de Lorca-Alhama de Murcia y al S por el Campo de Cartagena. El límite E lo constituye la zona de Torrevieja-Alicante, caracterizada por su elevada sismicidad. Corresponde a las Zonas Internas de la Cordillera Bética, destacando la presencia del Complejo Nevado-Filábride.

Zona 3: Lorca

Corresponde a las áreas sismotectónicas de Guadalentín, Torrecilla, Lorca, Espuña, Fortuna Molina, Bajo Segura, Mula (parte) y Medio Segura (parte). Está limitada al N por la Banda Norbética (accidente del Negratín), a la que se asocia una importante sismicidad,

y al S por la falla Lorca-Alhama de Murcia, a la que también se asocia sismicidad. El límite W lo define el sistema de fallas de desgarre del Alquián. En general la sismicidad se relaciona con las fallas mencionadas y con otras asociadas de orientación NW-SE cubiertas por depósitos recientes.

Zona 4: Torrevieja-Alicante

Corresponde al área de Torrevieja-Alicante y se caracteriza por presentar una elevada sismicidad histórica, asociada a un proceso de acortamiento tectónico en una zona de corteza continental adelgazada. Pertenece a las Zonas Internas de la Cordillera Bética. Destaca la presencia de materiales del Neógeno y Cuaternario de Alicante.

Zona 5: Caravaca-Yecla

Incluye las áreas sismotectónicas de Caravaca-Calasparra, Pila, Mula (parte) y Medio Segura (parte), de la provincia de Murcia, dentro del dominio sismotectónico septentrional. La zona está limitada al S por el gran accidente denominado como Banda Norbética (accidente del Negratín), al N por la falla de Yecla-Jumilla, al E por el Mar Mediterráneo y al W por el sistema del fallas de desgarre del Alquián. El límite N viene definido por un cambio significativo de la sismicidad. Corresponde en su mayor parte a las Zonas Externas de la Cordillera Bética.

Zona 6: Albacete

Situada al N de la Zona 4, corresponde con las Zonas Externas de la Cordillera Bética. Presenta escasa sismicidad, asociada siempre a pequeñas fallas subparalelas a la Banda Norbética y a fallas de orientación NW-SE.

Zona 7: Almería

Corresponde a la zona de Almería, limitada al NE por el sistema de fallas de desgarre del Alquián, al W por el meridiano 3°W y al S por el Mar Mediterráneo, en una zona de marcado cambio de la sismicidad. La sismicidad se relaciona con la actividad de fallas de dirección NW-SE. Pertenece a las Zonas Internas de la Cordillera Bética; destaca el desarrollo del Complejo Alpujárride.

Zona 8: Sierra de Gata

Limita al N con la falla de Lorca-Alhama de Murcia, al SW con el sistema de fallas de desgarre del Alquián, al SE con la costa mediterránea y al E con la Zona 1 a través de la falla de Palomares. Pertenece a las Zonas Internas de la Cordillera Bética y su sismicidad se asocia a la falla de desgarre NE-SW de la Serrata-Carbonera, a pequeñas fallas asociadas y a procesos de vulcanismo reciente de la Sierra de Gata.

Zona 9: Mar Mediterráneo

Se extiende por el Mar Mediterráneo y la zona de costa según un radio próximo a 200 km alrededor de Cartagena. Se trata de una zona de muy baja sismicidad histórica, dada la dificultad de registro en el mar, y de sismicidad baja a moderada en el período de registro instrumental.

En el Anexo 2 (Zonación sismogenética del área de estudio) puede observarse la distribución de las 9 zonas sismogenéticas consideradas en el estudio. Con la unión y superposición de las 9 zonas sismogenéticas se cubre la totalidad del territorio en un radio máximo de 200 km alrededor de la zona de estudio.

Si bien esta compartimentación es específica para este estudio, se han tenido también en cuenta otras zonificaciones, afectando al Sureste de España, publicadas por distintos autores.

3.3. Parámetros sísmicos de las zonas sismogenéticas

A continuación se describen los parámetros sísmicos de cada zona sismogenética:

- **Intensidad máxima**

Este parámetro se corresponde con la máxima capacidad destructora que puede generarse. En el Cuadro 3.2 se muestra la relación de intensidades máximas y mínimas de cada una de las zonas. La intensidad mínima corresponde al valor menor considerado en los análisis.

Cuadro 3.2. Intensidades

Zona	Máxima		Mínima
	Periodo histórico	Periodo instrumental	
1	V	VI	III
2	VII	VI	III
3	VIII	VI	III
4	X	VI	III
5	IX	VII	III
6	IX	VI	III
7	IX	VI	III
8	IX	VII	III
9	VI	VI	III

- **Profundidad focal**

Si bien se puede incorporar para cada zona la profundidad focal estimable en los terremotos, en los cálculos realizados se ha supuesto que son sismos superficiales. Ello es debido a que las curvas de atenuación que se han utilizado están basadas en distancias epicentrales. De esta manera se ha despejado la incertidumbre que existe al respecto, sin incorporar necesariamente una fiabilidad menor en los resultados alcanzados.

Estudios llevados a cabo en la zona en estudio han mostrado que los terremotos son relativamente superficiales, y en cualquier caso se puede suponer una profundidad próxima o inferior a los 10 km, motivo por el cual esta hipótesis está ligeramente del lado de la seguridad.

Para cada zona sismogenética se ha llevado a cabo un análisis estadístico de la profundidad focal de los terremotos, cuyos resultados se muestran a continuación en las Figuras 3.1 a 3.9. En la Figura 3.10 se muestra la profundidad focal para el conjunto de la sismicidad de toda la región estudiada, es decir la superposición de las 9 zonas sismogenéticas.

Figura 3.1
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 1

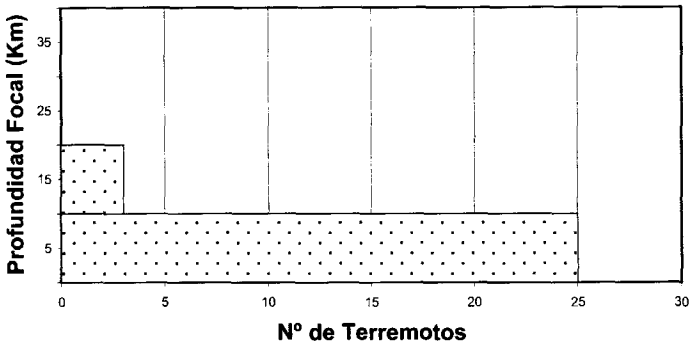


Figura 3.2
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 2

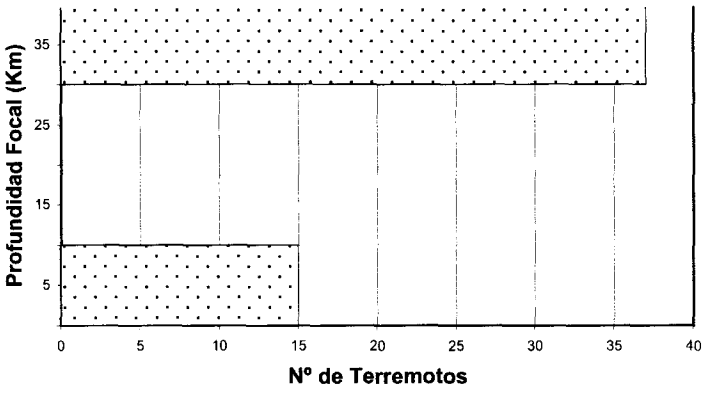


Figura 3.3
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 3

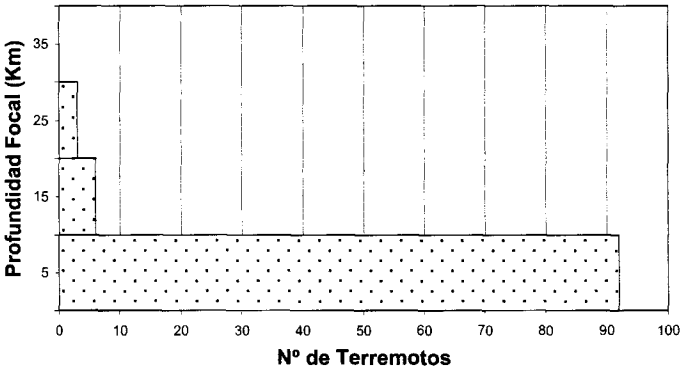


Figura 3.4
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 4

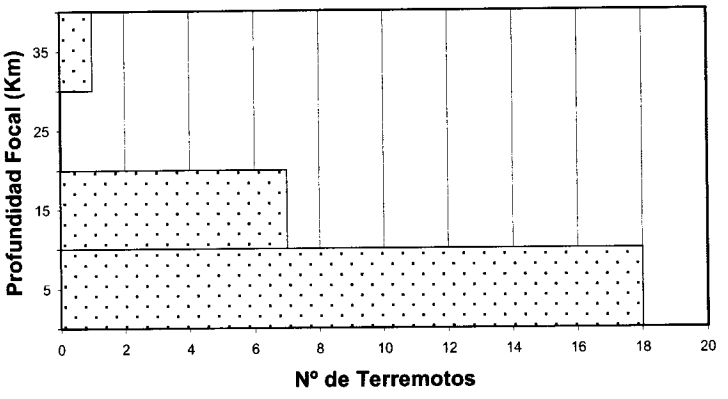


Figura 3.5
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 5

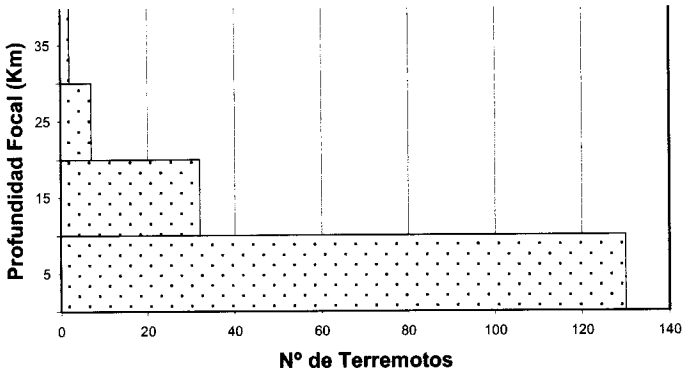


Figura 3.6
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 6

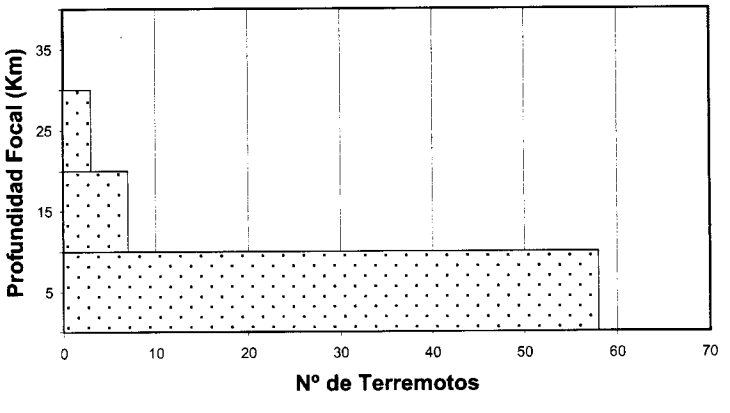


Figura 3.7
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 7

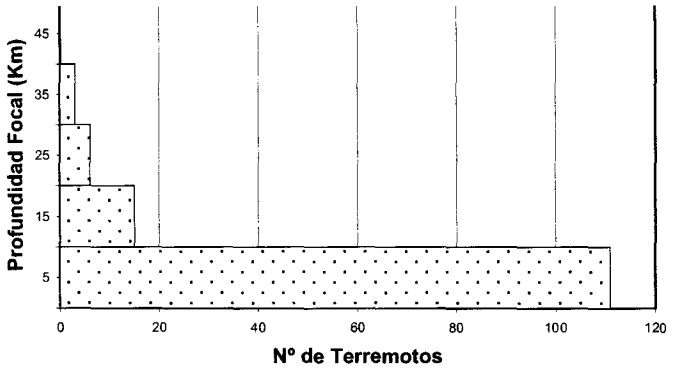


Figura 3.8
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 8

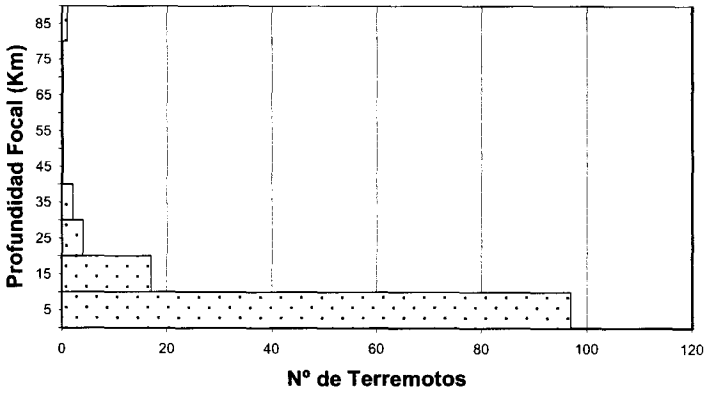


Figura 3.9
Profundidad focal en la Zona Sismogenética 9

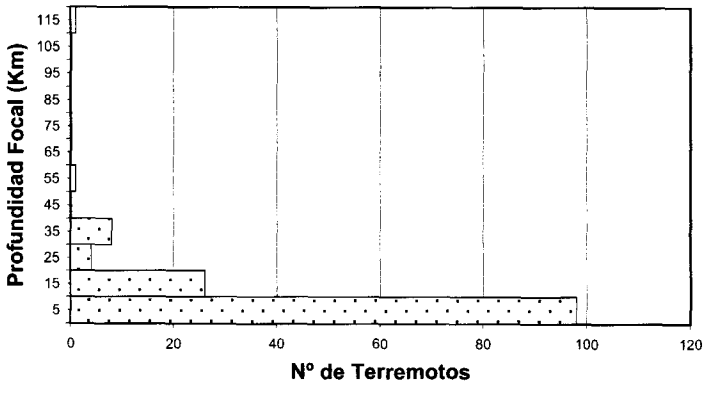
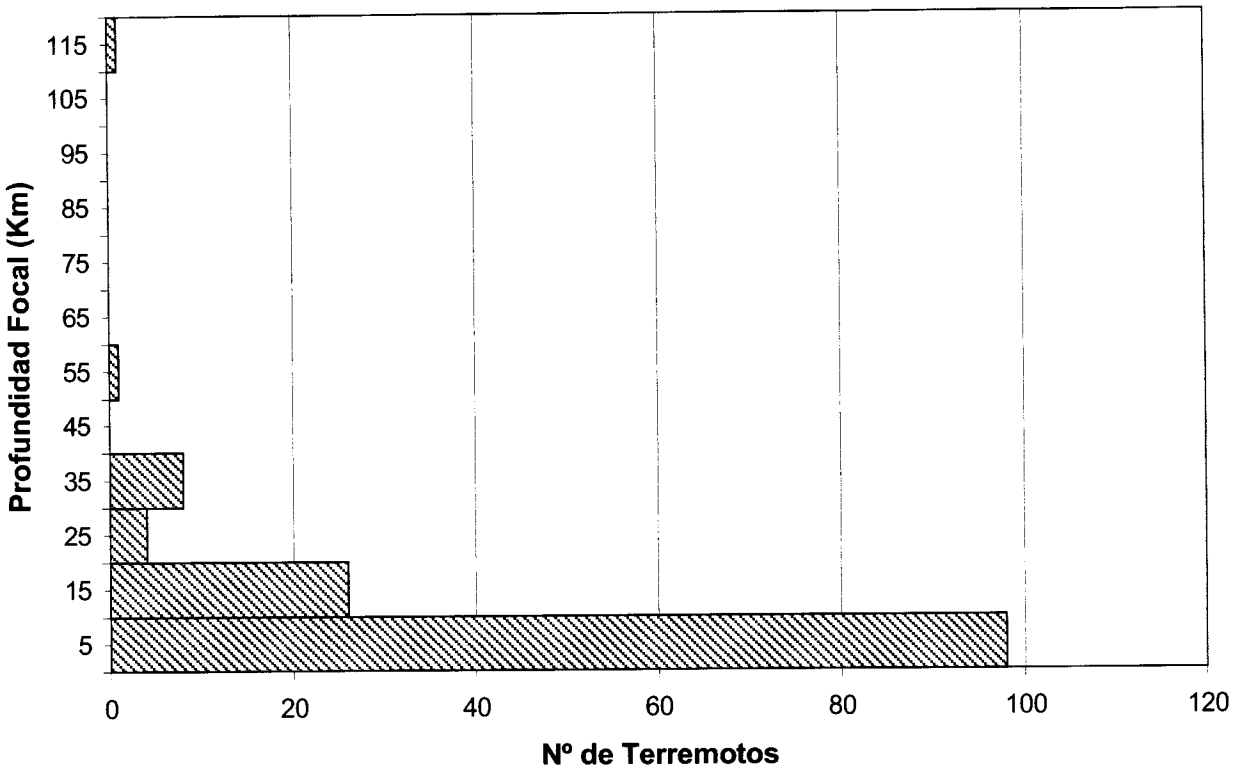


Figura 3.10
Superposición de las 9 Zonas sismogenéticas



- **Relación frecuencia – intensidad**

En base al análisis de la sismicidad de cada zona, es necesario valorar la relación que existe entre el número de terremotos (N) que superan una determinada intensidad y los valores de esta intensidad (I). La expresión más utilizada es del tipo:

$$\text{Ln } N = \alpha + \beta I$$

siendo α y β = constantes.

Los valores de β son una de las constantes identificadoras de cada zona sismogenética. Existen mapas de este parámetro que permiten evaluar indirectamente su potencial sísmico. β es la pendiente de la recta en la expresión citada, mientras que α es el valor de partida en el eje de ordenadas. Los valores deducidos del parámetro β se presentan en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Relaciones frecuencia-intensidad (Ln N = $\alpha + \beta I$)

Valores de β		
Zona	**Periodo histórico**	**Periodo instrumental**
1	0.2351	0.9981
2	0.5663	0.9234
3	0.3255	1.0017
4	0.6257	1.1160
5	0.6764	1.1758
6	0.3380	1.2316
7	0.5647	1.0138
8	0.7225	1.5668
9	0.8154	0.9363

- **Tasa anual de terremotos**

El valor de la tasa (número anual de terremotos) se obtiene directamente del catálogo sísmico. Se corresponde con el número de terremotos/año con intensidad superior a una determinada. Es necesario conocer el año de referencia, a fin de valorar el período para el cual se debe suponer que ha acontecido un determinado evento. En el Cuadro 3.4 se presentan, para cada zona sismogenética, los valores de las tasas.

Cuadro 3.4. Tasas anuales de terremotos

Zona	Periodo histórico	Periodo instrumental
1	0.2808	0.8891
2	0.2762	0.9080
3	0.6778	1.7243
4	1.1280	0.8464
5	1.2265	3.8240
6	0.3380	2.0074
7	1.1464	2.7222
8	1.3878	2.6592
9	0.9087	3.5872

4. PELIGROSIDAD SISMICA

La peligrosidad sísmica se estima a partir de métodos probabilistas, pudiendo llegar a valorar la intensidad máxima a partir del método determinista. Los resultados se presentan en función del período de retorno.

4.1. Antecedentes

La antigua "Norma Sismo-Resistente Española" (PDS-1974) suponía tres tipos de sismicidad en función de la zona en estudio: baja, media y alta. Al entorno de la ciudad de Cartagena se asignaba una sismicidad media-alta con valores de intensidad de I=VIII en la escala MSK.

En la Instrucción para Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas, se presenta un mapa con 3 zonas de sismicidad: baja, media y alta. Cartagena se sitúa en la zona de sismicidad media, en la cual deben calcularse las estructuras y dispositivos cuyo buen funcionamiento es vital para la seguridad de las presas (aliviaderos, etc.), de manera que resistan una aceleración sísmica horizontal igual a la máxima probable en 500 años, y otra vertical con un valor igual a la mitad de la horizontal. En caso de no conocerse dicha aceleración probable, se adoptará para la componente horizontal un valor comprendido entre el 5 y el 10 % de la aceleración de la gravedad, y para la vertical la mitad de la horizontal.

Según Martín y Sierra (1981), considerando datos sísmicos de partida para el periodo entre los años 1405 y 1980, se asignan valores de I=VI para un período de retorno de 500 y 1.000 años para la región de Cartagena. Martín Martín (1983) realiza análisis para una amplia gama de supuestos, tanto en los períodos de análisis de la sismicidad histórica como a partir del análisis de la peligrosidad sísmica. Con las hipótesis teóricas y con una distribución de terremotos basada en la relación frecuencia-intensidad, asigna valores de I≥VI para periodos de retorno T=100, 500 y 1000 años, tomando como base los datos sísmicos correspondientes al periodo 1380-1980. A modo de síntesis, otras hipótesis consideran que para T=500 años la Intensidad correspondiente es en la mayor parte de las ocasiones de VI-VII, y para T=1000 de I=VII. De la misma manera, el autor considera que la Intensidad Máxima Sentida, para el período de datos sísmico 1936 - 1982, sería la correspondiente a un valor de la Intensidad igual a VI. A su vez considera que para un terremoto de I=VIII el período de retorno que le

correspondería sería siempre superior a 1.000 años, excediendo en algunos supuestos los 10.000 años.

La nueva Norma de Construcción Sismoresistente NCSE-94 proporciona un mapa de peligrosidad sísmica basado en criterios probabilistas, considerando un período de retorno T=500 años. La Norma distingue 3 áreas con aceleración sísmica básica menor de 0.04 g, entre 0.04 g y 0.12 g, y mayor de 0.12 g. A Cartagena le corresponde una aceleración sísmica de 0.05 g.

En resumen puede aceptarse, a partir de la información suministrada por diferentes fuentes documentales, un valor de la Intensidad de cálculo de VII, indicativo de la sismicidad esperable para un terremoto cuyo período de retorno sea superior a 1000 años (esto equivale a que exista un 95% de probabilidades de que no sea excedido en 50 años).

4.2. Análisis determinista

En el análisis determinista se caracteriza la Peligrosidad Sísmica únicamente mediante un valor: la acción sísmica máxima esperable en el emplazamiento o la zona de estudio.

En el caso del presente estudio, los grandes accidentes o fallas sismogenéticas coinciden con los límites de las zonas sismogenéticas consideradas, por lo que el análisis determinista debe centrarse en la consideración de dichas provincias o zonas, asignando al emplazamiento el mayor terremoto ocurrido en la provincia sismogenética en que se encuentra.

La ciudad de Cartagena se encuentra en la Zona sismogenética 1, en la que la intensidad máxima alcanzada es V para el periodo de tiempo histórico. En otras provincias limitrofes, o en zonas situadas a mayor distancia, las intensidades máximas registradas superan los valores de I=VII y VIII. En estos casos, se aplican las leyes de atenuación de la intensidad con la distancia con el fin de determinar la intensidad que llegaría al punto estudiado de terremotos generados en otras zonas sismogenéticas.

Las distancias mínimas de cada zona sismogenética a la ciudad de Cartagena se incluyen en el Cuadro 4.1. Las intensidades máximas de cada zona sismogenética se muestran en el Cuadro 4.2.

Los resultados obtenidos del análisis determinista se resumen en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.1. Distancia entre Zonas sismogenéticas y la ciudad de Cartagena

	Zonas sismogenéticas							
	2	3	4	5	6	7	8	9
Distancia a Cartagena (km)	25	37	37	58	104	143	73	9

Cuadro 4.2. Intensidad máxima de las Zonas sismogenéticas

Nº zona	**Intensidad máxima**
2	VII
3	VIII
4	X
5	IX
6	IX
7	IX
8	IX
9	VI

Cuadro 4.3. Resultados del análisis determinista de la peligrosidad sísmica

Ley de atenuación	**Origen del Terremoto**								
	Zona 1 I=V	Zona 2 I=VII	Zona 3 I=VIII	Zona 4 I=X	Zona 5 I=IX	Zona 6 I=IX	Zona 7 I=IX	Zona 8 I=IX	Zona 9 I=VI
1	V	IV	IV	VI	IV	II	I	III	V
2	V	V	V	VII	V	IV	III	V	VI
3	V	V	V	VII	V	IV	IV	V	V
4	V	IV	IV	VI	IV	III	II	IV	VI
Valor medio	V	V	V	VII	V	III	II	IV	V
Terremoto Determinista	I=VII								

La zona sismogenética con mayor influencia respecto a la sismicidad de la ciudad de Cartagena es la zona 4 (Torrevieja), dada su elevada sismicidad histórica y la proximidad a la zona 1 (donde se encuentra Cartagena). La sismicidad inducida por el resto de zonas sismogenéticas apenas excede la sismicidad propia de la zona 1; a pesar de haberse registrado terremotos históricos de intensidad mayor a los sentidos en el área de Cartagena, presentan una escasa influencia dada su distancia a la ciudad.

En definitiva, el mayor valor de intensidad obtenido en el análisis determinista para la ciudad de Cartagena es VII. El período de retorno que correspondería a un terremoto de estas características, como se verá en el análisis probabilista, es superior a 1.000 años.

4.3. Análisis probabilista

Este método permite la realización de un análisis en términos probabilistas, adoptando criterios estadísticos para la definición de la peligrosidad sísmica asociada a la sismicidad regional del entorno de la ciudad de estudio.

En el análisis se ha utilizado una división del área de influencia sísmica sobre la Ciudad de Cartagena en zonas sismogenéticas, es decir, subdivisiones del territorio en las cuales existe la misma probabilidad de ocurrencia de sucesos, una tasa constante en el tiempo y una probabilidad de presentación de los mismos según una ley estadística de tipo poissoniano.

La selección de los terremotos para el estudio de la sismicidad de Cartagena se ha realizado a partir del Catálogo Sísmico español del Instituto Geográfico Nacional.

Se han empleado 4 leyes de atenuación, tres de ellas obtenidas de trabajos anteriores de evaluación del riesgo sísmico en distintos puntos de esta región, así como leyes aplicables al entorno de la Península Ibérica; la restante se ha definido en este trabajo para la zona de estudio a partir de 27 mapas de isosistas disponibles de terremotos históricos (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Leyes de atenuación de la intensidad con la distancia

Nº	Expresión	Fuente
1	I_0-I = 3.79 In (R+15)-11.59	Martín Martín (1983)
2	I_0-I = 3.82 In (R+25)-13.38	Martín Martín (1983)
3	I_0-I = 2.46 In (R+25)-7.40	Grupo de trabajo Norma PDS (1986)
4	I_0-I = 2.38 In R-5.10	Ley propia para este trabajo (1997)

Para el análisis se ha utilizado el programa de cálculo EQRISK de la Universidad de Berkeley (California), elaborado por R.K. McGuire, ampliamente aplicado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos y en múltiples países de todo el mundo.

Los resultados obtenidos para los diferentes niveles de riesgo asociados con los períodos de retorno se presentan en los Cuadros 4.5 y 4.6. Puede observarse cómo para un mismo período de datos sísmicos de partida, a pesar de poseer una misma zonificación, la dispersión de resultados es notable. No obstante los valores considerados corresponden a los valores medios obtenidos.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran gráficamente, en escala semilogarítmica, la totalidad de los resultados obtenidos que relacionan el período de retorno (T) y la intensidad correspondiente, para las dos bases de datos sísmicos utilizadas.

Cuadro 4.5. Parámetros de sismicidad del Periodo Histórico. Valores de la Intensidad para diferentes niveles de riesgo

Ley de atenuación	Periodo de retorno (años)				
	10	50	100	500	1000
1	3.00	4.16	4.56	5.24	5.45
2	3.94	5.06	5.47	6.24	6.47
3	3.82	5.01	5.45	6.15	6.29
4	3.00	3.77	4.17	4.95	5.08
Resultado	III ½	IV ½	V	V ½	VI

Cuadro 4.6. Parámetros de sismicidad del Periodo Instrumental. Valores de la Intensidad para diferentes niveles de riesgo.

Ley de atenuación	**Periodo de retorno (años)**				
	10	**50**	**100**	**500**	**1000**
1	3.05	4.33	4.78	5.58	5.90
2	3.61	4.68	5.07	5.74	6.01
3	3.45	3.63	3.94	4.38	4.56
4	<3.00	3.36	3.80	4.61	4.94
Resultado	III ½	IV	IV ½	V	V ½

Figura 4.1. Relación entre periodo de retorno e intensidad de cálculo para las 4 leyes de atenuación en el período histórico

Figura 4.2. Relación entre período de retorno e intensidad de cálculo para las 4 leyes de atenuación en el período instrumental

4.4. Selección de los terremotos característicos

Para la valoración de los terremotos característicos de la ciudad de Cartagena el primer problema es la selección del período de retorno.

Se considera que deben fijarse tres períodos de retorno para los cuales se deben considerar las intensidades de sus terremotos característicos. Estos períodos de retorno son los de 50, 100 y 1000 años, para los que corresponden terremotos de intensidad IV½, V y VI respectivamente. Los valores de intensidad reseñados se han obtenido a partir del análisis probabilista de la peligrosidad sísmica, empleando los datos de terremotos históricos. La intensidad VII corresponde al valor máximo de intensidad sentida, deducida a partir de los estudios deterministas. A esta intensidad VII le correspondería un período de retorno superior a 1.000 años según los resultados probabilistas.

Considerando que la vida media útil de la mayoría de las instalaciones es de 100 años, la probabilidad de que se produzca el terremoto de Intensidad IV½, V, VI y VII en los próximos 100 años es la siguiente (Cuadro 4.7):

Cuadro 4.7. Probabilidad de ocurrencia de terremotos para diferentes períodos de retorno

Período de retorno	**Intensidad**	**Probabilidad de ocurrencia en 100 años**
50 años	IV½	87%
100 años	V	63%
1000 años	VI	9,5%
> 1000 años	VII	< 9.5%

A la vista de las probabilidades de ocurrencia para los terremotos de intensidad IV½ a VII en los próximos 100 años, se considera, a efectos de diseño de estructuras y edificios, como característico el terremoto de I=VI y período de retorno 1000 años. Para construcciones singulares o edificios extremadamente vulnerables el terremoto de diseño será el de Intensidad I=VII.

Por lo tanto, los parámetros sísmicos característicos (magnitud, duración y aceleración) y su espectro de respuesta, serán calculados para dichos terremotos, cuya intensidad I=VI e I=VII en la escala MSK serán consideradas como "las intensidades de cálculo". Estos valores pueden considerarse definidos con criterios ligeramente conservadores en líneas generales.

5. PARAMETROS SISMICOS CARACTERISTICOS Y ESPECTROS DE RESPUESTA DE LOS TERREMOTOS

5.1. Introducción

Las ondas sísmicas generadas por el terremoto característico, al alcanzar la ciudad de Cartagena, afectarán con mayor o menor grado a las edificaciones en función de:

- la respuesta del suelo (sustrato geológico), que a su vez depende de:
    - condiciones geológico-geotécnicas: composición, estado de compactación, profundidad del nivel freático, espesor de estratos, etc.
    - factores de tipo morfológico y topográfico
- la respuesta propia de la edificación (tipo de construcción, altura, tipo de cimentación, etc.).

Dadas las incertidumbres y las dificultades inherentes a la predicción de los movimientos sísmicos, se definen los parámetros de cálculo y se adoptan decisiones que, en general, se pueden considerar como razonablemente conservadoras. Con ello se pretende no sólo obtener un resultado del lado de la seguridad, sino también ofrecer una panorámica global de las posibilidades y variaciones que existen al respecto.

5.2. Hipótesis consideradas en el estudio

Las hipótesis consideradas son las siguientes:

- En el caso de la ciudad de Cartagena, además de definir el espectro de respuesta normalizado en base a documentos normativos, se ha realizado un estudio detallado de la amplificación o atenuación de la señal sísmica en el terreno en función de las condiciones geológico-geotécnicas de las formaciones superficiales. De manera complementaria se ha evaluado el terremoto característico esperable para un período de retorno de T = 1000 años, es decir, para una probabilidad anual de ser superado el terremoto de 0.001.

- La ausencia de un número suficiente de registros reales en España lleva implícita la necesidad de incorporar adicionalmente márgenes de seguridad razonables, dentro de cada paso teórico que se efectúa.

- En el desarrollo de este estudio se han asociado los valores de cálculo con el concepto del Período de Retorno (T), esto es, la inversa de la probabilidad de ocurrencia de un determinado acontecimiento. En el Cuadro 5.1 se muestran, en tanto por uno, los valores que resultan para períodos de retorno (T) de 10, 50, 100, 500, 1000, 5000 y 10.000 años y esperanza de vida o vida útil de las obras de 10, 50, 100 y 200 años.

Cuadro 5.1. Valores de probabilidad en función de la vida de la instalación (t)

1/T	**T**	**t=10 años**	**t=50 años**	**t=100 años**	**t=200 años**
0.1	10	0.6513	0.9948	0.9999	1.0000
0.02	50	0.1829	0.6358	0.8674	0.9824
0.01	100	0.0956	0.3950	0.6340	0.8660
0.002	500	0.0198	0.0953	0.1814	0.3299
0.001	1000	0.0100	0.0488	0.0952	0.1814
0.0002	5000	0.0020	0.0100	0.0198	0.0392
0.0001	10000	0.0010	0.0050	0.0100	0.0198

5.3. Estimación de la magnitud

La magnitud es un parámetro que por su propio significado (es función de la energía liberada por el terremoto), y por el hecho de que se determina instrumentalmente, puede ser valorado con mayor objetividad y rigor. En general ha podido ser correlacionado con otros parámetros típicos de los terremotos (tales como son las aceleraciones pico, velocidad máxima, desplazamiento, etc.) con mayor facilidad y con menores dispersiones en los resultados obtenidos.

Dado que todos los datos pre-instrumentales se expresan en términos de Intensidad ha sido necesario el establecimiento previo de relaciones Intensidad-Magnitud con el fin de disponer de mayor información. De las distintos correlaciones I-M, la propuesta por el IGN (1981) ofrece valores medios, obteniéndose para el terremoto de diseño de I=VI una

magnitud de 4.7, mientras que al terremoto máximo esperable de I=VII le correspondería una magnitud de 5.2.

Dado que los valores de magnitud son de 4.7 y 5.2, se ha considerado adecuado suponer que, a efectos de cálculo de los parámetros significativos, los terremotos de magnitud 4.7 y 5.2 de la escala Richter son equivalentes a unos de Intensidad I = VI y VII respectivamente en la escala de Mercalli Modificada, o en la escala MSK.

Se ha analizado también la evolución en el tiempo de las distintas correlaciones utilizadas, a fin de poder detectar si existe alguna tendencia clara al irse incorporando un mayor número de datos. No se ha detectado de manera clara algún tipo de tendencia, salvo quizás que los valores más elevados se han producido con las expresiones más antiguas, circunstancia que se refleja en el valor medio de las expresiones posteriores al año 1980, ligeramente inferior a la media total.

5.4. Duración

La duración que tiene la sacudida sísmica es determinante de los efectos destructivos que puede producir. A pesar de su importancia, el concepto de duración de un terremoto, extendido habitualmente al de duración de un acelerograma, es un concepto amplio, que puede resultar ambiguo. Es susceptible de varias interpretaciones y de hecho se dan criterios e hipótesis diferentes, según los diversos autores. Probablemente sea el parámetro que es objeto, conceptualmente, de una mayor incertidumbre.

Normalmente el concepto más extendido, hablando en términos generales, es el de la duración correspondiente a la fase del "movimiento fuerte del suelo" ("strong motion duration"), inicialmente empleado por Housner y Donovan, y que posteriormente ha sido precisado analíticamente en función de la energía acumulada. En términos coloquiales, puede asimilarse con el tiempo en el cual se libera gran parte de la energía total movilizada por un terremoto.

Las predicciones de la duración del "movimiento fuerte del terremoto" oscilan entre un valor mínimo de 5 seg. y un valor máximo que se puede cifrar en el entorno de 25 seg.

Teniendo en cuenta las notables diferencias que resultan de aplicar unos criterios u otros, e incorporando las recomendaciones habituales que existen, se ha seleccionado una duración para la fase de movimiento fuerte, zona que se puede denominar como "estacionaria", de 15 seg.

Para el tiempo inicial, correspondiente a la zona de crecimiento, puede considerarse como válido un valor de 5 seg.

El tiempo a considerar para la zona de decrecimiento es muy variable y oscila entre el 50% y el 500% aproximadamente. Para la aplicación concreta al caso del terremoto "lejano", se considera aceptable asignar unos valores para la fase de decrecimiento de 10 seg.

En definitiva, la duración total (D) del terremoto propuesto es de:

D = 5 + 15 + 10 = 30 seg.

Estos valores individuales o conjuntos se pueden considerar del lado de la seguridad, habida cuenta de todas las consideraciones efectuadas.

5.5. Aceleración máxima

Según la "Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-94)", para la ciudad de Cartagena se asigna un valor correspondiente de 0.05 g; es decir, un 5% de la aceleración de la gravedad.

El valor de la aceleración sísmica de cálculo, a_c, se ha estimado en 0.05 g para un periodo de vida de 50 años y en 0.065 g para 100 años. Estos valores corresponden a la sismicidad de un período de retorno de 500 años. Para un terremoto de I=VI correspondiente a un período de 1.000 años se deduciría un valor de aceleración próximo a 0.07 g para t=50 años y 0.09 g para t=100 años.

De la misma manera, la Norma NCSE-94 define el espectro elástico de respuesta horizontal en función del tipo de terreno y del denominado "coeficiente de contribución", que para el municipio de Cartagena es de 1.

A la vista de los datos anteriores y considerando las incertidumbres que existen al respecto, a efectos de criterio de daños posibles se adopta un valor de aceleración máxima horizontal de 0.08 g.

5.6. Espectros de respuesta

Son muy escasos los registros de terremotos acontecidos en la Península Ibérica de los cuales se hayan podido calcular los espectros de respuesta. Los terremotos registrados, en el sur de España, han presentado muy baja intensidad, y todavía no se dispone de un cuerpo de doctrina al respecto lo suficientemente contrastado como para identificar las peculiaridades de los terremotos "españoles" en cuanto a sus contenidos frecuenciales. Por este motivo, la práctica más habitual en este tipo de estudios consiste en:

- utilizar correlaciones que definen los espectros de respuesta a partir de los parámetros básicos de los terremotos
- utilizar espectros definidos en normativas institucionales.

Normativa española

La norma española NCSE-94 es de obligado cumplimiento y en su apartado 2.3. define el espectro elástico de respuesta para movimientos horizontales, y en su apartado 2.4. para movimientos verticales.

Dado que debe ser aplicable, al menos teóricamente, en multitud de emplazamientos posibles donde las condiciones locales del terreno son muy influyentes, y ello exigiría particularizar en cada caso, esta Norma resulta adecuada para los fines generalistas aquí pretendidos.

El espectro de respuesta viene definido para movimientos horizontales, correspondientes a un oscilador lineal simple con un amortiguamiento de referencia del 5% respecto al crítico, en función de:

- un coeficiente del suelo (C) dependiente de las características del terreno existente en los primeros 30 metros bajo la estructura
- un coeficiente de contribución (K) que tiene en cuenta la peligrosidad sísmica de cada punto de los distintos tipos de terremotos considerados en el cálculo de la misma.

Para la ciudad de Cartagena el valor de K es igual a la unidad, motivo por el cual el espectro de respuesta resultante viene definido en función del tipo de terreno, de acuerdo con la siguiente clasificación:

2 **Tipo de terreno I**: Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. La velocidad de transmisión de las ondas elásticas transversales o de cizalla debe ser superior a 750 m/s. (El valor de C es igual a 1.0)

3 **Tipo de terreno II**: Terrenos granulares o cohesivos de compacidad media a dura. Velocidad de propagación de las ondas elásticas de corte comprendida entre 400 y 750 m/s. (El valor de C es igual a 1.4)

4 **Tipo de terreno III**: Suelo granular suelto a medio, o suelo cohesivo medio o blando. La correspondiente velocidad de propagación de las ondas elásticas de corte debe ser inferior a 400 m/s. (El valor C es igual a 1.8).

A modo de síntesis, en la Figura 5.1 se define el espectro de respuesta Normalizado, en función del tipo de terreno.

Para valores del amortiguamiento (Q) distintos del 5%, las ordenadas del espectro, para períodos superiores a 0.15 (0.20 y 0.25), se multiplicarán por un factor igual a $(5/Q)^{0.4}$. Para períodos inferiores se recomienda que las ordenadas espectrales se interpolen linealmente entre los valores correspondientes a T = 0 y los valores citados anteriormente.

A su vez, cuando sea preciso considerar movimientos verticales, se recomienda adoptar un espectro elástico de respuesta cuyas ordenadas espectrales sean el 70% de los valores correspondientes a los del espectro definido para los movimientos horizontales.

Proyecto de Eurocódigo Nº 8

El proyecto de Eurocódigo Nº 8, denominado "Diseño Sismorresistente de Estructuras", en su parte 1: General y Edificaciones, define la acción sísmica por medio de una normalización del Espectro de Respuesta.

Los efectos de las características locales del suelo se tienen en cuenta a través de la modificación de la forma del espectro de respuesta. Se deben considerar tres tipos de suelo:

Suelo tipo A (a grandes rasgos: V_s > 700 m/seg.)

5 A1: Roca dura o formaciones rocosas blandas de extensión considerable tanto en área como en profundidad, siempre que no muestren señales de fragmentación intensa.

6 A2: Capas extensas de material granular de grano grueso particularmente densas con pequeños porcentajes de arcilla o limo.

7 A3: Capas extensas de arcilla muy rígida, resistente y sobreconsolidada con valores altos de la resistencia a compresión simple.

Suelo tipo B (a grandes rasgos: V_s = 300 - 600 m/seg.)

8 B1: Formaciones de roca intensamente erosionadas o suelos que pueden ser asimilados a ellas desde el punto de vista de sus características mecánicas.

9 B2: Materiales granulares de grano grueso de densidad relativa media.

10 B3: Arcilla de rigidez media, ligeramente sobreconsolidada.

Suelo tipo C (a grandes rasgos: V_s = 100 - 200 m/seg.)

11 C1: Materiales granulares de grano grueso suelto con valores de densidad relativa baja.

12 C2: Suelos arcillosos/limosos de rigidez reducida.

La sistemática utilizada y la caracterización de los espectros de respuesta normalizados definidos en función del tipo de terreno son muy similares a las presentes en la Normativa Española (NSCE-94).

Otras Normativas

Existen múltiples normativas y recomendaciones en diferentes países que permiten definir el espectro de respuesta. Cabe mencionar las recomendaciones francesas (AFPS90). En la Figura 5.2 se muestra el espectro de respuesta según la normativa francesa; el criterio que se utiliza es muy similar al del Eurocódigo y al de la Normativa Española. Con vista a la clasificación de los suelos se consideran tres grupos, en función de sus propiedades mecánicas:

Grupo a: Suelos de buena y muy buena resistencia, por ejemplo arcillas duras y suelos granulares compactos (V_s > 800 m/seg.).

Grupo b: Suelos de resistencia media, por ejemplo rocas alteradas, suelos granulares medianamente compactos y suelos arcillosos medios (V_s = 500-800 m/seg.).

Grupo c: Suelos granulares blandos y arcillas blandas (V_s<500 m/seg.).

Figura 5.1. Espectro de respuesta normalizado a partir del tipo de terreno. (NCSE-94)

Figura 5.2. Espectro de respuesta según la normativa francesa.

6. ZONACIÓN SÍSMICA DE CARTAGENA

6.1. Introducción

Como se ha puesto de manifiesto en el estudio de peligrosidad sísmica de Cartagena, la ciudad se encuentra situada en un área con actividad sísmica de baja a moderada. El terremoto característico de la zona alcanzaría una intensidad de grado VI en la escala MSK y una probabilidad de ocurrencia igual a 1 para un periodo de retorno de 1.000 años. La presencia de una cobertera cuaternaria (Pleistocena y Holocena), sobre la cual se cimientan prácticamente la totalidad de las edificaciones de la ciudad, puede dar lugar a un aumento considerable del movimiento del suelo en caso de terremoto, haciéndose necesaria la evaluación de esta posible amplificación.

Para conocer la magnitud del fenómeno y discriminar las zonas con distinto grado de amplificación, se ha realizado la zonación sísmica, basada en una clasificación sismico-geotécnica previa y en la aplicación de métodos de simulación numérica de efectos locales.

6.2. Zonación sísmico-geotécnica del área urbana de Cartagena

Para realizar la zonificación sísmico-geotécnica de Cartagena se han utilizado como base los Mapas Geológico y Geotécnico a escala 1:15.000 elaborados en el presente proyecto. En función de las litologías descritas y sus correspondientes características geotécnicas se ha dividido la zona de estudio en seis áreas que agrupan terrenos con similar respuesta ante terremotos. Estas son:

Area I: Compuesta por el sustrato rocoso aflorante: filitas y cuarcitas y calcoesquistos (Permico), calizas y colomías (Triásico), margas, areniscas micaceas, margas arcillosas y areniscas calcáreas (Plioceno), Formación Carbonatada con niveles de calizas, costras, cantos, arenas y conglomerados (Pleistoceno Inferior) e intrusiones volcánicas. Todos ellos presentarían una respuesta de terrenos estables ante terremotos. Se entiende por terreno estable aquel que por sus características geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas, etc., no presenta fenómenos de licuefacción ni da lugar a amplificación de ondas sísmicas

Area II: Formada por depósitos cuaternarios antiguos de terraza y de abanico aluvial, y depósitos cuaternarios recientes de abanico aluvial y glacis. Presentarían una ligera amplificación de ondas en las zonas de mayor espesor de suelos y con niveles freáticos superficiales. Serían terrenos estables ante terremotos.

Area III: Depósitos aluviales, fondos de ramblas, llanuras de inundación temporalmente activas y zonas de acumulación de agua de escorrentía. En ellos se produciría una moderada amplificación de ondas con moderado riesgo de licuefacción ante terremotos máximos.

Area IV: Formada por rellenos antrópicos con espesores de hasta 8 metros. En ellos se produciría una amplificación media de las ondas con riesgo medio de licuefacción ante terremotos máximos.

Area V: Depósitos cuaternarios de relleno del Almarjal: rellenos antrópicos, limos, arenas y fangos de hasta doce metros de profundidad. En ellos se produciría una amplificación alta de ondas con riesgo medio-alto de licuefacción ante terremotos máximos.

Area VI: Terrenos ganados al mar: limos, arenas y gravas compactadas, bloques rocosos y obras portuarias sobre depósitos de bahía. Tendría lugar una amplificación media de las ondas sísmicas con riesgo alto de licuefacción ante terremotos máximos. Este riesgo no existiría para materiales gruesos (escolleras, etc.).

6.3. Amplificación sísmica en función del tipo de suelos

La presencia de terrenos flojos rellenando cuencas produce un aumento considerable de los daños por terremotos en las ciudades edificadas sobre estas zonas, al condicionar la amplificación y modificar los periodos de vibración de las ondas sísmicas.

Parte de la ciudad de Cartagena se encuentra situada en áreas que presentan estas características. En concreto, la zona que ocupaba el antiguo Almarjal y la zona oeste del

casco antiguo son claros ejemplos de suelos flojos. En estas zonas se encuentran cimentados varios edificios públicos, edificios de interés cultural y un gran número de zonas residenciales. Por ello se ha estimado conveniente realizar un estudio en detalle del nivel de amplificación que la señal sísmica del terremoto característico de Cartagena podría alcanzar en el área urbana. Para analizar los posibles efectos de amplificación se ha utilizado el método lineal-equivalente Shake´91 (Idriss y Sun, 1992), debido a su nivel de estandarización y las condiciones locales características de la zona de estudio.

Se persigue conocer en que grado se modifica el efecto sísmico procedente de un terremoto de fuente lejana cuando las ondas se propagan a través de los diferentes materiales del subsuelo de Cartagena. Para ello se han calculado las relaciones de las funciones de transferencia de la señal sísmica entre el basamento y la superficie en cada una de las áreas definidas.

La metodología empleada para conocer el nivel de amplificación de la señal sísmica que se transmitiría en los diferentes suelos de la ciudad de Cartagena si fuesen afectados por el terremoto característico se basa en:

- Selección de diez "columnas estratigráficas tipo" que se consideran representativas de las condiciones reales del terreno existente en Cartagena, tanto en lo relativo a los tipos de suelos, como a sus espesores característicos.

- Selección de un terremoto real ocurrido en una zona con la sismicidad propia de Cartagena. Entre varias alternativas se ha seleccionado el acelerograma obtenido durante el reciente terremoto de Mula (Murcia), que se utiliza como dato de entrada para la simulación de la respuesta del terreno.

- Análisis de la respuesta del terreno mediante el programa Shake-91. Simulación de los efectos del acelerograma mencionado sobre las distintas columnas tipo de terreno, a las que se asignan propiedades físicas y mecánicas, tomando además como referencia el terremoto característico que puede ocurrir en la ciudad de Cartagena, según los análisis probabilistas y deterministas realizados.

– Tratamiento, transformación y representación gráfica de los resultados de la simulación mediante una hoja de cálculo.

Columnas tipo y parámetros de cálculo

Las columnas tipo del terreno se han obtenido para cada zona definida en el Mapa Geotécnico de Cartagena. Las variaciones de espesor y/o de litologías que se presentan en algunas áreas, como sucede en los terrenos aluviales, han sido consideradas con su valor medio. En las áreas I, IV y V, donde estas diferencias son sustanciales, se ha optado por una subdivisión; por ejemplo, el área V se ha subdivido en tres subzonas, en función del espesor de fangos y la profundidad del sustrato firme.

Así, se han definido las siguientes columnas estratigráficas tipo:

I_a: Sustrato rocoso aflorante de calizas, margas o rocas volcánicas.

I_b: 2.50 m de calizas y limos encostrados, sobre sustrato de margas y areniscas.

II: 2.0 m de arcillas limosas, 2.4 m de caliche y/o gravas, 9.0 m de limos arcillosos y 10.0 m de arena arcillosa o margosa sobre el sustrato de margas y areniscas.

III: 5 m de limos, 5 m de arenas, limos y gravas alternantes, 5 m de grava arenosa sobre el sustrato.

IV_a: 7 m de rellenos antrópicos, 5.0 m de limo fangoso y arcilloso, 2.0 m de arenas, y el sustrato de gravas y/o filitas.

IV_b: 2 m de rellenos antrópicos y sustrato de calizas y/o filitas.

V_a: 2m de rellenos antrópicos, 3 m de arcillas, 11 m de arcillas arenosas y el sustrato de margas y areniscas.

V_b: 1.6 m de rellenos antrópicos, 6.5 m de limos y fangos, 10.9 m de arcillas y arenas y el sustrato de margas y areniscas.

V_c: 3 m de rellenos antrópicos, 10 m de limos y fangos, 9 metros de gravas y arenas y el sustrato de filitas y esquistos

VI: 7 m de rellenos compactados, 7 m de arenas arcillas y fangos, 10 m de arenas y gravas, 2 m de areniscas y el sustrato de filitas y esquistos.

Para realizar la simulación numérica de los efectos que los suelos producen en la propagación de las ondas sísmicas es necesario conocer varios parámetros de los mismos: densidad aparente, velocidad de propagación de las ondas de cizalla (V_s), módulo de cizalla dinámico máximo (G_{max}) y espesor de las capas. Para la obtención de estos datos, se ha realizado un análisis estadístico de los resultados de los ensayos geotécnicos recopilados en la base de datos geotécnicos de Cartagena realizada para este proyecto.

Las columnas y los parámetros obtenidos se presentan a continuación:

Area I_a	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Sustrato	-	2.5	100	>800

Area I_b	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Formación carbonatada	2.5	2.1	65	690
	Sustrato		2.5	100	>800

Area II	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Arcilla limosa	2	2.1	35	170
	Caliche o Grava	2	2.2	100	700
	Limo arcilloso	11	2.1	40	200
	Arena margosa	10	2.2	100	565

Area III	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Limo	5	1.85	8	180
	Arena, limo y Grava.	5	2.1	9	180
	Limo arcilloso	5	2.23	49	330
	Sustrato		2.3	100	915

Area IV_a	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Relleno	7	1.7	6	150
	Limo, arcilla y fango	5	1.75	7	180
	Limo arcilloso	2	1.85	34	330
	Sustrato o gravas		2.3	100	915

Area IV_b	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Formación carbonatada	2	1.7	6	130
	Sustrato		2.5	100	>800

Area V_a	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Relleno	2	1.6	4	115
	Arcilla	5	1.94	6	235
	Arcilla arenosa	12	2.13	40	500
	Sustrato Marga		2.11	100	740

Area V_b	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Relleno	1.6	1.6	4	115
	Limo y fango	6.5	1.4	3	195
	Arcilla y arenas	11	2.1	19	255
	Sustrato Marga		2.33	100	>800

Area V_c	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Relleno	3	1.6	4	115
	Limo y fango	10	1.4	10	190
	Gravas	11	2.3	66	365
	Sustrato Esquistos		2.6	100	>800

Area VI	Litología	Espesor (m)	γ_{ap} (t/m^3)	N	V_s (m/s)
	Relleno compactado	7	2.1	15	145
	Arcillas y fangos	7	1.7	12	155
	Arenas y Gravas	10	2.2	51	180
	Areniscas	2	2.5	100	260
	Sustrato Esquistos		2.5	100	>800

Nota: Los rellenos varían de 2 a 12 metros; el valor medio tomado de referencia en los cálculos es de 7 m.

Resultados

Dado que las señales de entrada estaban referidas al acelerograma de Mula actuando en el basamento aflorante, se ha calculado la relación espectral relativa (relative spectral ratio-RSR) en cada una de las áreas, entendida como la relación entre la función de transferencia de la señal sísmica en un área dada y la del material de basamento.

Los gráficos que relacionan las funciones de transferencia obtenidos son del tipo amplificación frente a periodo y se presentan en las Figuras 6.1 a 6.8. En ellos se observa cómo las condiciones del terreno modifican notablemente los resultados. Así, en los casos con mayores espesores de materiales blandos pueden alcanzarse valores de amplificación de hasta 4 veces el valor de la señal incidente para periodos muy concretos. Sin embargo, en los casos en los que el terreno es firme o presenta menores espesores de rellenos y/o fangos, el valor de amplificación se sitúa en valores próximos a 1, es decir, sin efecto de amplificación de la señal. No se han representado los resultados obtenidos para las áreas I_a y IV_b ya que en estas zonas no se produce amplificación alguna.

En base a los resultados gráficos obtenidos se ha realizado la caracterización de las áreas anteriormente descritas, en función de la amplificación de la señal sísmica esperable por efectos locales. Para ello se ha utilizado la siguiente escala de amplificación:

Cuadro 6.1 Escala de amplificación

Amplificación	
1 – 1,2	Muy Baja
1,2 – 1,7	Baja
1,7 – 2,5	Media
2,5 – 3,5	Alta
> 3,5	Muy alta

La zonificación del área urbana de Cartagena por efectos de amplificación máxima esperable para el terremoto característico se presenta en el Cuadro 6.2:

Cuadro 6.2 Zonificación del área urbana en función de la amplificación máxima esperable

Área	**Amplificación máxima esperable para el terremoto característico**	
Area I_a	1	Muy Baja
Area I_b	1,06	Muy Baja
Area II	2,03	Media
Area III	2,02	Media
Area IV_a	1,9	Media
Area IV_b	1	Muy Baja
Area V_a	4,04	Muy alta
Area V_b	2,22	Media
Area V_c	3,2	Alta
Area VI	1,22	Baja

Como se puede observar, la amplificación máxima esperable para el terremoto característico es muy baja en las áreas en las que el sustrato aflora o hay poco espesor de recubrimientos (I_a, I_b y IV_b). En la mayoría de las áreas la amplificación es media, excepto para las ocupadas por el depósito de colmatación del antiguo Almarjal (V), donde la amplificación puede llegar a ser de media a muy alta.

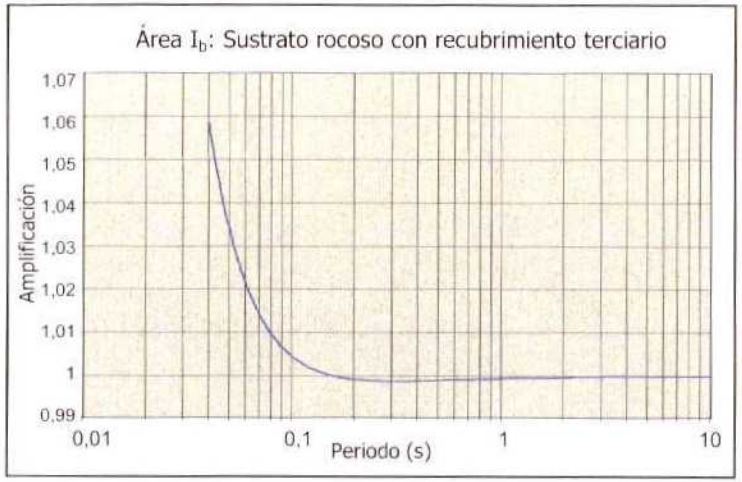
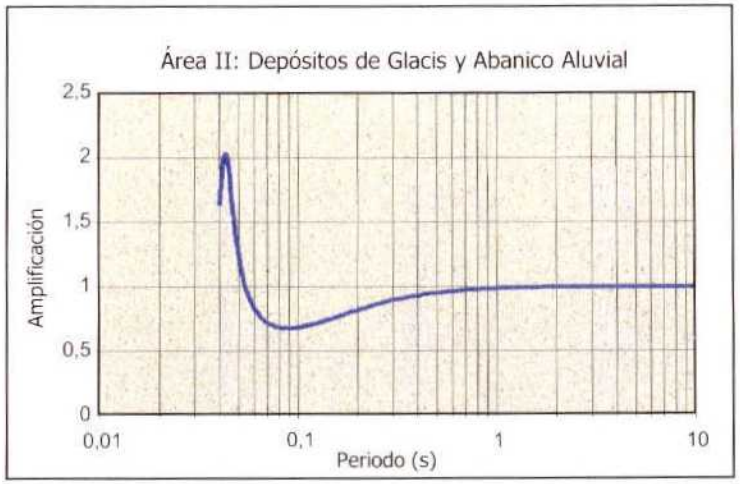


Figura 6.1



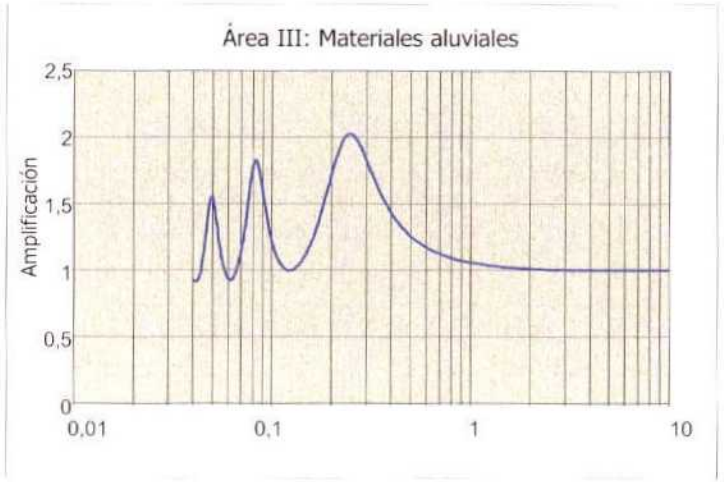


Figura 6.3

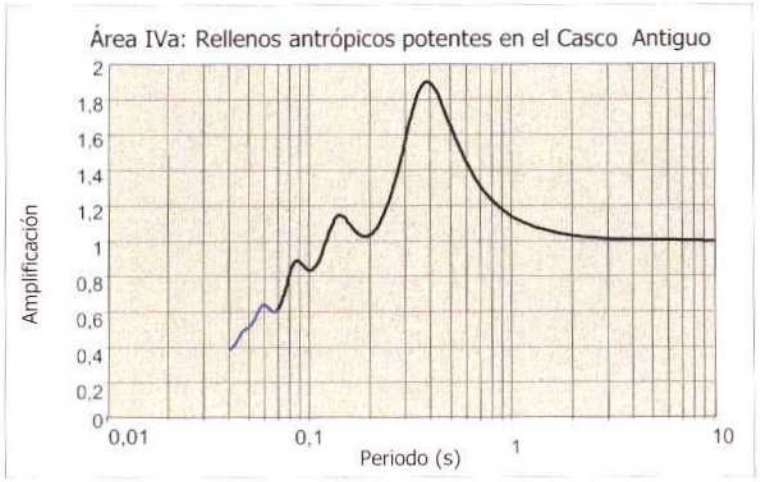


Figura 6.4

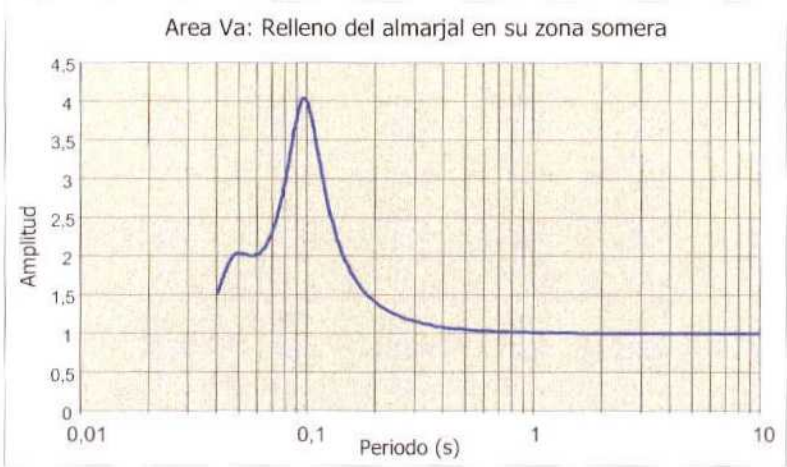


Figura 6.5

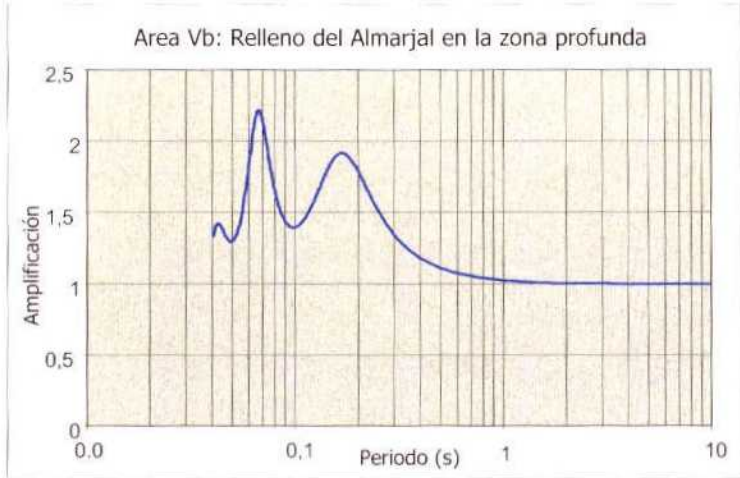


Figura 6.6

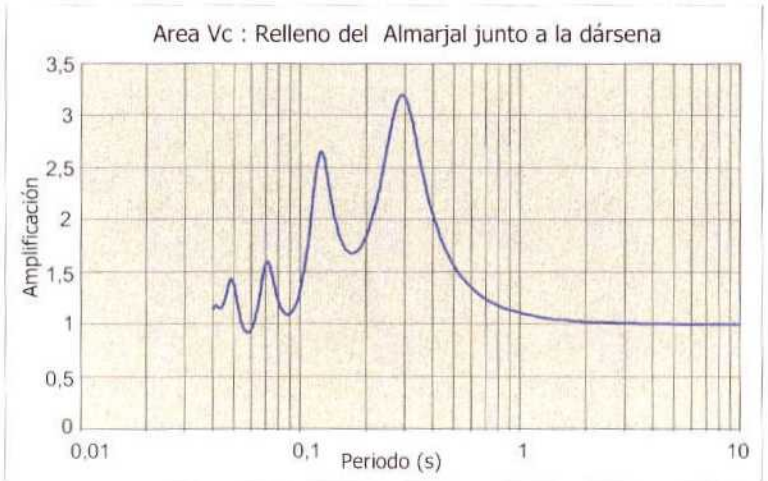


Figura 6.7

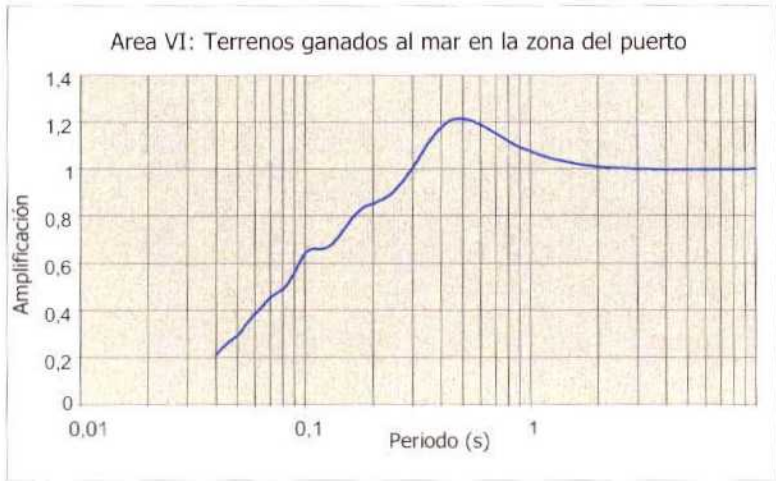


Figura 6.8

7. VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS

7.1. Introducción

La vulnerabilidad se define como el grado de daño que un evento destructivo de determinadas características e intensidad puede producir en bienes o personas.

Con la finalidad de estimar el grado de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas en Cartagena, se ha determinado el número de plantas de los edificios construidos en cada una de las áreas definidas en el Mapa de Zonación Sísmico-geotécnica del área urbana de Cartagena.

La altura de los edificios es un factor determinante en el grado de daños que puede ocasionar un evento sísmico. El valor del desplazamiento provocado por la llegada de la onda es función del periodo de propagación de la misma y del periodo de resonancia del edificio, que a su vez depende de su esbeltez (relación base - altura del edificio).

Este efecto se muestra en la Figura 7.1 en la que se observa cómo los edificios de mayor altura son afectados cuando el periodo de vibración de las ondas sísmicas es alto. Esto se corresponde con el espectro respuesta típico de movimientos sísmicos en zonas con suelos flojos y alejadas del epicentro, como es el caso de Cartagena.

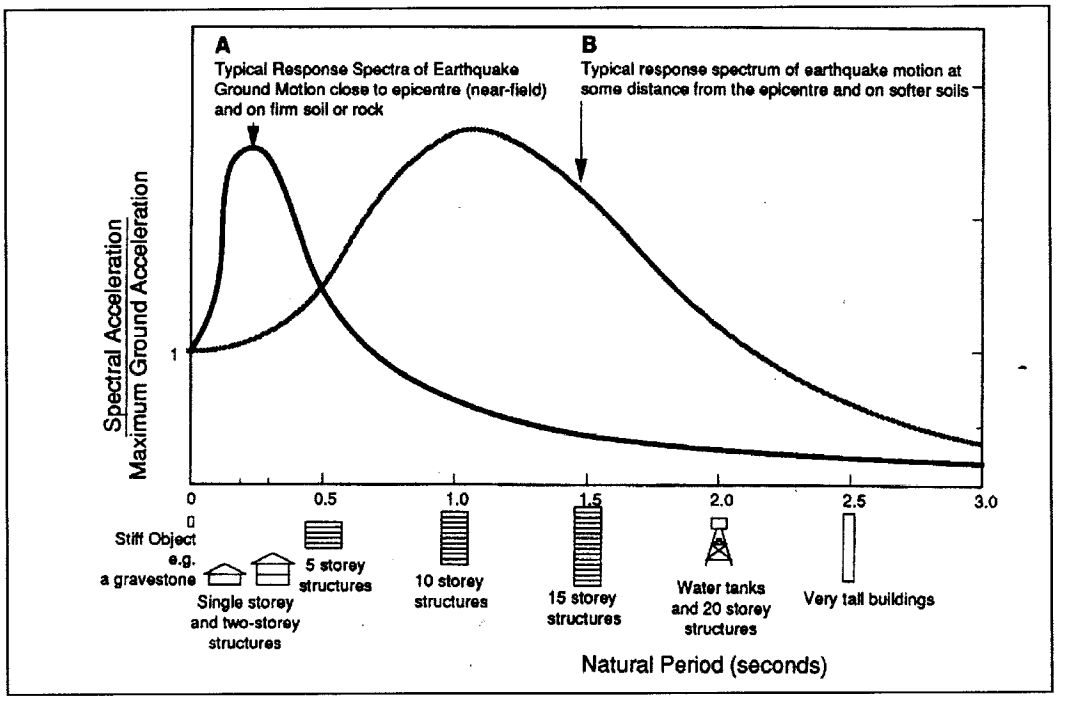


Figura 7.1. Espectros respuesta típicos y tipos de edificación que son afectadas. El periodo de vibración de los edificios crece en función del número de alturas que tengan. (Coburn y Spence, 1992)

7.2. Cartografía de respuesta sísmica aplicada a la edificación en el área urbana de Cartagena

La cartografía de respuesta sísmica en la ciudad de Cartagena se ha realizado en base a dos tipos de datos:

1- Datos obtenidos del análisis de amplificación de la señal sísmica por efecto de sitio, representados en las curvas de propagación de las ondas sísmicas o de relación de funciones de transferencia (gráficos amplificación - periodo). Se han elaborado curvas para cada una de las áreas definidas con objeto de conocer en qué grado un terremoto con fuente lejana puede propagarse en el subsuelo de Cartagena.

2- La distribución espacial de la altura de los edificios en cada área, según los tipos de edificación existentes en cada zona y la determinación de su vulnerabilidad relativa.

Los datos de amplificación máxima y periodo correspondiente se han obtenido de las curvas presentadas en el apartado 6.3.

La altura de los edificios se ha determinado por el número de plantas mediante interpretación de fotos aéreas a escala 1:3.500 del casco urbano de Cartagena. Posteriormente se han calculado los porcentajes relativos de cada tipo de edificio en función de la siguiente clasificación:

Cuadro 7.1 Tipología de edificación según su altura

Tipo	**Número de plantas**	**Periodo de vibración dominante**
1	1-2	0.1 a 0.3
2	3-5	0.3 a 0.6
3	≥ 6	> 0.6

Como ha sido indicado, el grado de vulnerabilidad sísmica de los edificios depende, entre otros parámetros, de la esbeltez de la estructura.

Una vez calculados los porcentajes relativos de edificios de distinta altura en cada zona y conocidos los periodos de vibración dominantes para cada tipo definido, se comparan con los periodos en los que se observa la máxima amplificación en cada área.

Por último se caracteriza cada área en función de la vulnerabilidad de los edificios existentes en la misma, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- la amplificación se correlaciona con el alcance del evento sísmico
- el valor de la máxima amplificación se corresponde con un determinado periodo de vibración
- el periodo correspondiente a la máxima amplificación define el tipo de edificaciones más vulnerable
- la respuesta sísmica de cada zona es función del número y tipo de edificios vulnerables y de la amplificación esperada de la señal sísmica.

El resultado obtenido se presenta en el Cuadro 7.2, en donde se relacionan los parámetros necesarios para la caracterización de las áreas en función de la respuesta sísmica actual de la Ciudad de Cartagena.

A partir de la información anterior se ha realizado el Mapa de Respuesta Sísmica de la ciudad de Cartagena, a escala 1:15.000.

Cuadro 7.2 Caracterización de las áreas en función de su respuesta sísmica

Area	**Porcentaje de edificios**			**Relación de funciones de transferencia**		**Tipo de edificios vulnerables**	**Respuesta sísmica**
	Tipo 1	**Tipo 2**	**Tipo 3**	**Amplificación máxima**	**Periodo (s)**		
I_a	100	0	0	1 (Muy baja)	-	Ninguno	Muy Baja
Ib	95	5	0	1,06 (Muy baja)	0.04	Ninguno	Muy Baja
II	78	17	5	2.03 (Media)	0.043	Ninguno	Baja
III	79	3	18	2.02 (Media)	0.25	**1**	Media-alta
IV_a	20	50	30	1,9 (Media)	0.37	**2** 1 3	Media-alta
IV_b	40	50	10	1 (Muy baja)	-	Ninguno	Muy Baja
V_a	27	51	22	4,04 (Muy alta)	0.095	**1**	Media
V_b	13	48	39	2,22 (Media)	0.07	**1** 2	Media-baja
V_c	19	34	47	3,2 (Alta)	0.3	**2** 3 1	Media-alta
VI	90	10	0	1,22 (Baja)	0.45	**2** 3	Baja

7.3. Ejemplo de aplicación de la cartografía de respuesta sísmica

Para la evaluación del grado de vulnerabilidad sísmica de un determinado edificio se parte de los datos que definen su situación espacial y el número de plantas que tiene.

Ejemplo: Se considera un edificio de 5 plantas situado en la c/ Jorge Juan nº 50; se busca el edificio en el plano de respuesta sísmica y se observa que se encuentra en la Zona II, a la que corresponde una respuesta sísmica Baja.

Además de la observación directa del mapa se puede realizar un análisis detallado de la vulnerabilidad de edificios en cada área. En concreto para el edificio del ejemplo el proceso de análisis sería:

1.- Definición del tipo de edificio

Utilizando el mapa de alturas de edificios se localiza el edificio y se observa que es de tipo B (entre 3 y 5 plantas).

2.- Obtención del periodo de vibración del edificio

A partir del gráfico de las curvas de propagación de las ondas sísmicas se obtiene que para un edificio de 5 plantas el periodo de vibración correspondiente es de 0.5 seg.

3.- Obtención del área sísmica en la que se encuentra el edificio

En el mapa de respuesta sísmica se observa que el edificio se encuentra en el Área II.

4.- Obtención de la máxima amplificación esperable en el área

Las Figuras 6.1 a 6.8 muestran las funciones de transferencia de las zonas definidas. El área II presenta una amplificación de 2.03 para un periodo de 0.043 seg. Amplificación media.

5.- Comparación del periodo de vibración del edificio con el periodo correspondiente a la máxima amplificación

El periodo del edificio es de 0.5 seg y la amplificación máxima en el área se produce a 0.043 seg. El efecto de amplificación máxima se produciría en periodos tales que el edificio no se vería afectado.

6.- Obtención de la amplificación esperable para el periodo de vibración del edificio

Observando la representación de la función de transferencia de la onda sísmica (graficas amplificación – periodo en las Figuras 6.1 a 6.8) se obtiene la amplificación esperable en el área para un edificio dado. En el ejemplo, al periodo del edificio le corresponde una amplificación de 0.9, lo que significa que el terremoto se atenúa.

7.- Resultado

Comparando el grado de amplificación y el tipo de edificios vulnerables se observa que el edificio del ejemplo tiene una Vulnerabilidad Baja frente a la respuesta sísmica de la zona frente al terremoto característico que puede afectar a Cartagena.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coburn, A. y Spence, R. (1992). "Earthquake protection". Ed. Willey.

Idriss, I.M. y Sun, J.I. (1992). "User's manual for Shake91. A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits". Center of Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis.

IGN (1982). "Catálogo general de Isosistas de la Península Ibérica", Publicación 202.

Martín Martín, A.J. (1983). Riesgo sísmico en España. Tesis Doctoral. IGN.

Martín, A.J. y Sierra, J. (1981). "Nuevos mapas de riesgo sísmico de la Península Ibérica obtenidos mediante la distribución de Gumbel, tipo I". Proc. IV Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Zaragoza, Vol. I, p.p.309-325.

Comisión permanente de Normas Sismorresistentes (1994). "Norma NCSE-94. Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación". IGN.

Comisión permanente de Normas Sismorresistentes (1974). "Norma Sismorresistente P.D.S.-1". Instituto Geográfico Nacional, 260 p.p.

ANEXOS

MAPA NEOTECTÓNICO REGIONAL

ZONACIÓN SISMOGENÉTICA REGIONAL

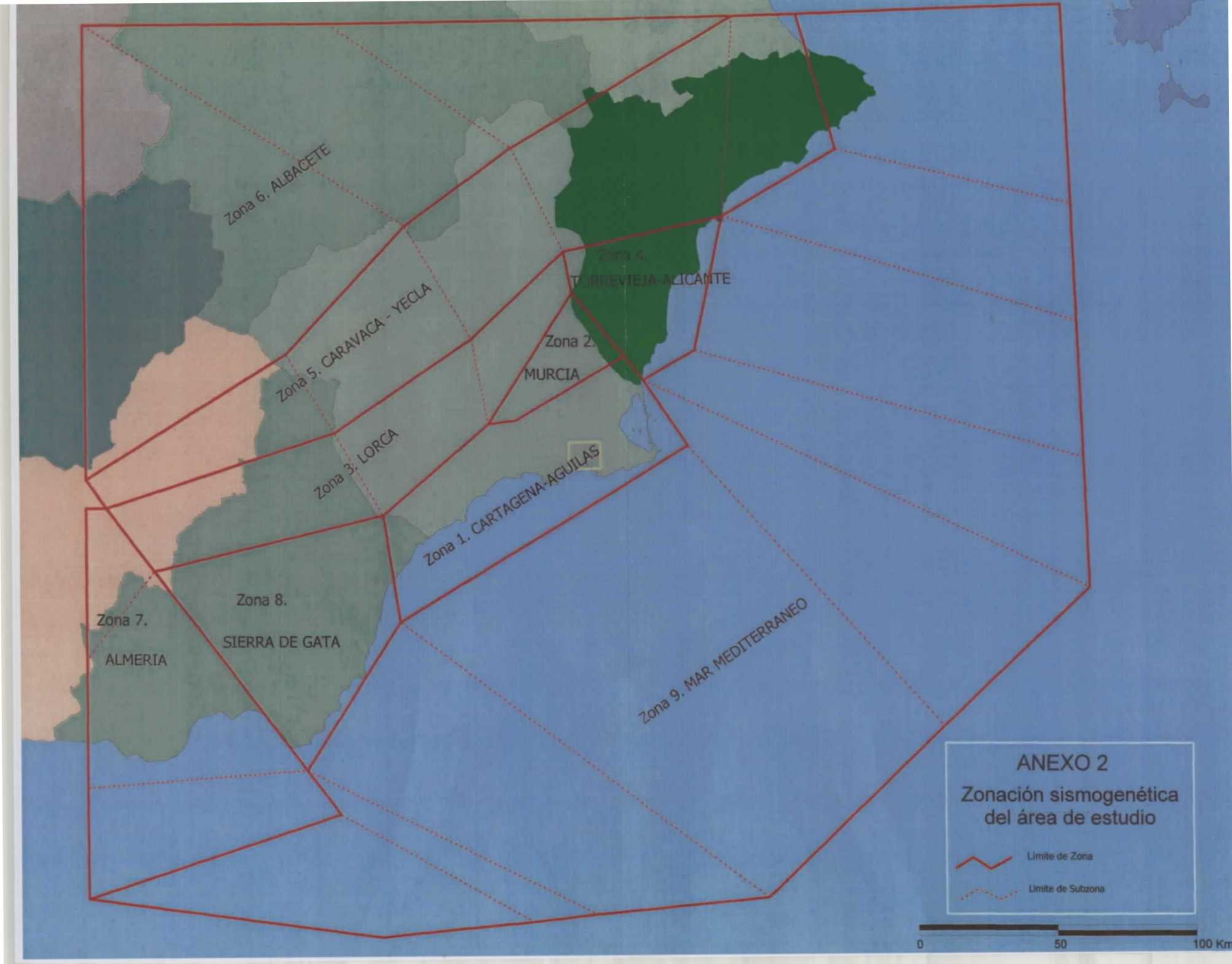
ANEXO 1

Extracto del "MAPA NEOTECTÓNICO DE LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE LA REGIÓN DE MURCIA"

Escala 1:200.000

ITGE, 1993

MURCIA
Sierra Altaona
Sa. de Columbares
Escollos
San Pedro del Pinatar
Puerto de San Pedro
Punta de Algas
Punta del Pudridero
Torre Pacheco
Los Alcázares
Pto. Deport. Tomas Maestre
Fuente Alamo
MAR MENOR
Isla
I. Perdiguera
I. Mayor o del Baron
I. del Sujeto
I. Rondella
I. del Ciervo
Los Nietos
Islas Menores
Mar de Cristal
Salinas de Marchamalo
La Union
Cartagena
Punta de los Aguilones
Cala Aguilar
Cala Salitrona
Cabezo de los Castillitos
Cabo Tiñoso
I. de Escombreras
Cabo del Agua
Cabo Negrete
Cala del Cuervo
Cala del Pastor
Cala del Rincon
Cala de las Cañas
Cala de Fausina
Cala del Gorguel
Salinas de Rasall
Rambla de Miranda
Rambla de Los Alcázares
Rambla de Albujón
Rambla de Los Cuadros
Rambla de Los Cuadros
Rambla de Los Cuadros


Zona 6. ALBACETE
Zona 5. CARAVACA - YECLA
Zona 4.
TORREVIEJA-ALICANTE
Zona 2.
MURCIA
Zona 3. LORCA
Zona 1. CARTAGENA-AGUILAS
Zona 8.
SIERRA DE GATA
Zona 7.
ALMERIA
Zona 9. MAR MEDITERRANEO
ANEXO 2
Zonación sismogenética
del área de estudio
Limite de Zona
Limite de Subzona
0
50
100 Km