

---

**INFORME DEL SISMO DE LORCA DEL 11 DE  
MAYO DE 2011**

---

Madrid, julio 2011

Redacción:

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

Luis Cabañas Rodríguez  
Emilio Carreño Herrero  
Arancha Izquierdo Álvarez  
José Manuel Martínez Solares

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Ramón Capote del Villar  
José Martínez Díaz

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Belén Benito Oterino  
Jorge Gaspar Escribano  
Alicia Rivas Medina

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA

Julián García Mayordomo  
Raúl Pérez López  
Miguel A. Rodríguez Pascua

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE INGENIERÍA SÍSMICA

Patrick Murphy Corella

## ÍNDICE

### 1.- INTRODUCCIÓN

### 2.- MARCO DE REFERENCIA. ANTECEDENTES

- 2.1. Sismicidad de la zona
- 2.2. Marco geológico
- 2.3. Peligrosidad sísmica de la Región de Murcia
- 2.4. Instrumentación

### 3.- CARACTERÍSTICAS DEL TERREMOTO

- 3.1. Coordenadas hipocentrales
- 3.2. Mecanismo focal y magnitud
- 3.3. Intensidades macrosísmicas
- 3.4. Características de la serie sísmica

### 4.- REGISTROS DE ACELERACIÓN

- 4.1. Introducción
- 4.2. Aceleraciones registradas
- 4.3. Espectros de respuesta
- 4.4. Atenuaciones del movimiento fuerte del suelo

### 5.- GEOLOGÍA

1. Fuente geológica.
2. Efectos geológicos.

### 6.- DAÑOS EN LAS EDIFICACIONES

1. Tipologías constructivas y características urbanísticas de la ciudad de Lorca
2. Daños observados durante el terremoto
3. Estadísticas de daños a edificios

### 7.- CONCLUSIONES

### BIBLIOGRAFÍA

### ANEXO – Escala EMS-98

# 1. INTRODUCCIÓN

En la reciente historia sísmica de España, desde el terremoto de 1956 en Albolote (Granada) con once muertos y el de 1969 al SW del Cabo San Vicente con cuatro, el terremoto de Lorca de 11 de mayo de 2011 (magnitud 5.1) ha vuelto a ser especialmente importante por haber ocasionado nueve víctimas mortales. El movimiento sísmico, localizado muy próximo a la ciudad de Lorca, ha afectado directamente a más de 90.000 personas, que han sufrido sus consecuencias al registrarse con una intensidad de grado VII en la escala europea EMS, lo que ha motivado daños notables en las viviendas.

El presente informe trata de reflejar las características del terremoto y de su serie de réplicas, recogiendo los trabajos que han desarrollado diferentes equipos de investigación, tanto previos al terremoto como posteriores. El estudio describe los aspectos científicos y técnicos de mayor interés, desde la historia sísmica de la zona hasta el comportamiento de las edificaciones de la ciudad de Lorca. Asimismo, se acompaña de un encuadre geológico de la zona y de las características de la falla de Alhama de Murcia, responsable de la ocurrencia del terremoto.

Como consecuencia de los terremotos que hubo la misma zona en el año 2005, precedidos por un apreciable nivel de actividad sísmica en los años 1999 y 2002, la región de Murcia fue objeto del proyecto RISMUR, cofinanciado por el Instituto Geográfico Nacional y en el que participaron los redactores de este informe. Algunos de los aspectos de este proyecto, en concreto los relativos a la peligrosidad sísmica han sido incluidos, incidiendo en los resultados que se obtuvieron en la ciudad de Lorca.

El informe va acompañado al final de una serie de conclusiones en relación con cada uno de los temas tratados, resaltando aquellos aspectos que se deberán tener en cuenta en futuros proyectos, a fin de mejorar por un lado el conocimiento de la sismicidad y peligrosidad sísmica y por otro para la adecuación de la normativa sismorresistente.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

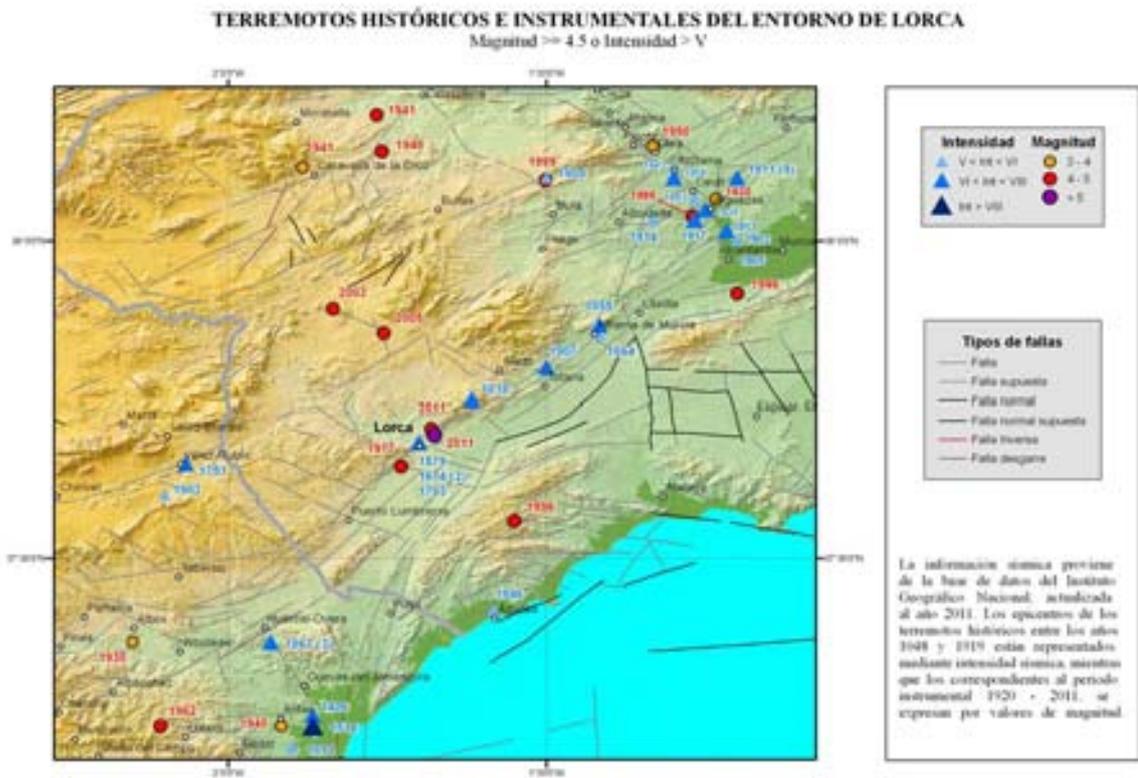
### 2.1. SISMICIDAD DE LA ZONA

La zona donde ha ocurrido el terremoto de Lorca tiene una actividad sísmica moderada dentro del contexto de la península Ibérica, donde se han producido terremotos de intensidad VIII-IX (EMS-98) en épocas históricas y de magnitud máxima registrada de 5.0 en el periodo instrumental. Considerando la zona comprendida entre los 37,2º y 38,2º de latitud norte y los -1,1º y -2,2º de longitud oeste en el entorno de Lorca, la distribución espacial de la sismicidad queda reflejada en el mapa de la figura 2.1., donde se puede apreciar la sucesión de terremotos históricos e instrumentales que han ocurrido a lo largo de la falla de Alhama de Murcia, responsable del reciente terremoto de Lorca, también representado en el mapa. Asimismo, aparecen otros núcleos de actividad notable en la vega del río Segura y en la provincia de Almería, sobresaliendo el terremoto de Vera de 1518, de intensidad VIII-IX. Al norte de la región se distingue la actividad más reciente, justo donde se han registrado las magnitudes instrumentales más elevadas.

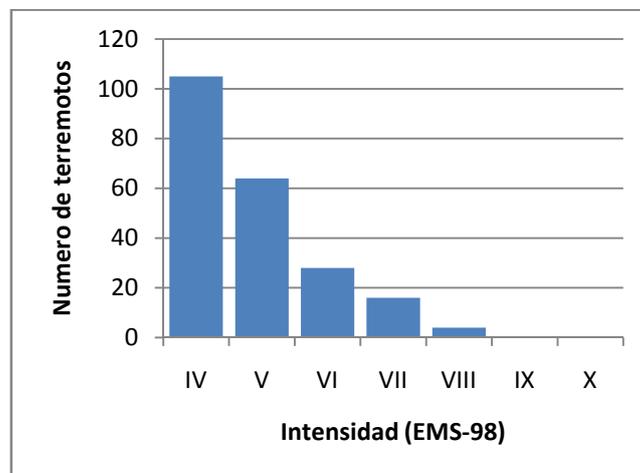
Una forma de cuantificar de la actividad sísmica de la región para todo el periodo conocido, tanto histórico como instrumental, consiste en contabilizar los terremotos y describirlos con un único parámetro mediante la intensidad macrosísmica. Así, el histograma de la figura 2.2 representa el número de terremotos para cada valor de intensidad. Desde el primer terremoto considerado hasta la actualidad se han observado 53 sismos de intensidad superior a V, es decir, aquellos que han ocasionado algún grado de daño. La tasa de actividad que resulta para este nivel de intensidad, sin considerar el actual sismo de 2011, sería de aproximadamente 0.1 terremotos/año.

Con objeto de analizar la sismicidad de forma coherente con la información disponible, la dividimos en los dos clásicos periodos, el histórico y el instrumental. El primero se

iniciaría con el primer sismo que tuviese intensidad asignada y coordenadas epicentrales, mientras que el segundo podría considerarse a partir del primer sismo con magnitud instrumental calculada, o que haya sido registrado instrumentalmente en al menos tres estaciones y con coordenadas epicentrales calculadas ya sea por métodos gráficos o numéricos. En nuestra área de interés, el periodo histórico empieza a principios del siglo XV y el instrumental en 1930.



**Figura 2.1.** Sismicidad de la zona de Lorca con terremotos de intensidad superior a V o magnitud igual o superior a 4.5.



**Figura 2.2.** Distribución del número de terremotos con intensidad para la zona de estudio.

### 2.1.1. Periodo histórico

Tal y como hemos señalado, el periodo histórico para esta zona lo podemos iniciar en el siglo XV con un terremoto en Vera. La tabla 2.1 recoge los terremotos de mayor intensidad, superior a VI, ocurridos en el área de estudio.

**Tabla 2.1** Listado de terremotos anteriores a 1930 con intensidad superior a VI (escalaEMS-98).

Fecha	Hora (GMT)	Latitud	Longitud	Intensidad	Localización
01/01/1406		37.2500	-1.8667	VII-VIII	Vera.AL
09/11/1518	23:30:00	37.2333	-1.8667	VIII-IX	Vera.AL
30/01/1579		37.6833	-1.7000	VII	Lorca.MU
28/08/1674	21:30:00	37.6833	-1.7000	VIII	Lorca.MU
04/03/1751		37.6500	-2.0667	VI-VII	Vélez Rubio.AL
20/12/1818	09:45:00	37.7500	-1.6167	VI-VII	NE Lorca.MU
11/11/1855	04:00:00	37.8667	-1.4167	VI-VII	Alhama de Murcia.MU
10/06/1863	11:10:00	37.3667	-1.9333	VI-VII	Huércal-Overa.AL
16/01/1883	03:40:00	38.0500	-1.2500	VI-VII	Ceutí.MU
26/09/1908	09:50:10	38.1000	-1.5000	VII	Mula.MU
21/03/1911	14:15:35	38.0167	-1.2167	VII	Las Torres de Cotillas.MU
03/04/1911	11:11:11	38.1000	-1.2000	VIII	Lorquí.MU
03/04/1911	14:29:46	38.1000	-1.2000	VIII	Lorquí.MU
20/05/1911	16:20:10	38.1000	-1.2000	VII	Lorquí.MU
03/09/1930	09:59:58	38.0667	-1.2333	VII	Lorquí.MU

De los terremotos recogidos en la Tabla 1.1 se describen brevemente los ocurridos en la ciudad de Lorca.

#### Terremoto de Lorca de 1579

Dentro de una serie sísmica sin poder especificar su duración, ocurrió en Lorca el 30 de enero un terremoto más intenso que el resto de los acaecidos, durante el cual muchos vecinos abandonaron la ciudad por haber quedado las “casas y edificios muy a peligro y arruinadas y muchas dellas caydas...” según citan Martínez Guevara y Fernández-Navarro Soto (1986) de un documento del Archivo Municipal de Lorca.

#### Terremotos de Lorca de 1674

Durante el año 1674 se produce de nuevo una serie sísmica próxima a Lorca de casi dos meses de duración, que se inicia el 10 de agosto con un terremoto premonitorio de intensidad V-VI. El terremoto principal sucede el día 28 de agosto las 21h 30m estimándose una intensidad de VIII dado que los daños en algunas edificaciones llegaron a ser muy graves. Al día siguiente se repitió la sacudida, así como los días 9 de septiembre y 5 de octubre. Aunque se sabe que hubo víctimas mortales, no se ha podido precisar el número. (Martínez Guevara y Fernández-Navarro Soro, 1986; Martínez Solares y Mezcua, 2002).

### Terremoto de Lorca de 1818

El día 19 de diciembre alrededor de las 16h se produce un sismo, también premonitorio, de intensidad IV con epicentro al NE de Lorca. Al día siguiente, a las 9h 45m ocurre el terremoto principal, sentido en Lorca, Totana y Murcia capital con una intensidad asignada de VI-VII (Martínez Solares y Mezcua, 2002). Según anota Rodríguez de la Torre (1993) "*dos personas quedaron muy mal heridas entre los escombros*" y observándose asimismo efectos sismogeológicos como el "*hundimiento de tierras*" entre Lorca y Totana.

#### 2.1.2. Periodo instrumental

Como hemos señalado anteriormente, el inicio del periodo instrumental corresponde al año 1930. Desde ese año se han registrado en el área de estudio más 2.200 terremotos, si bien casi 1.500 de ellos corresponden a magnitudes inferiores a 2.0 (figura 2.3). La magnitud máxima registrada, antes del terremoto de Lorca de 2011, alcanza el grado 5,0 y en todo este periodo han ocurrido en la zona 20 terremotos de magnitud igual o superior a 4.0.

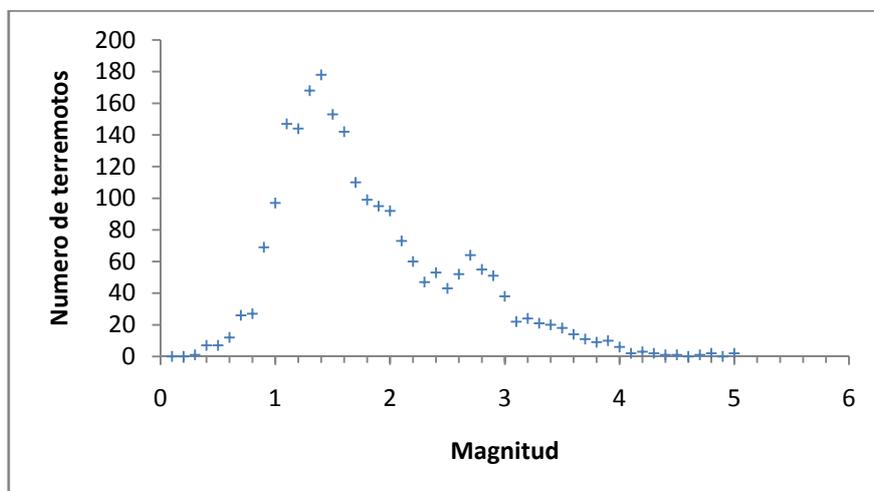
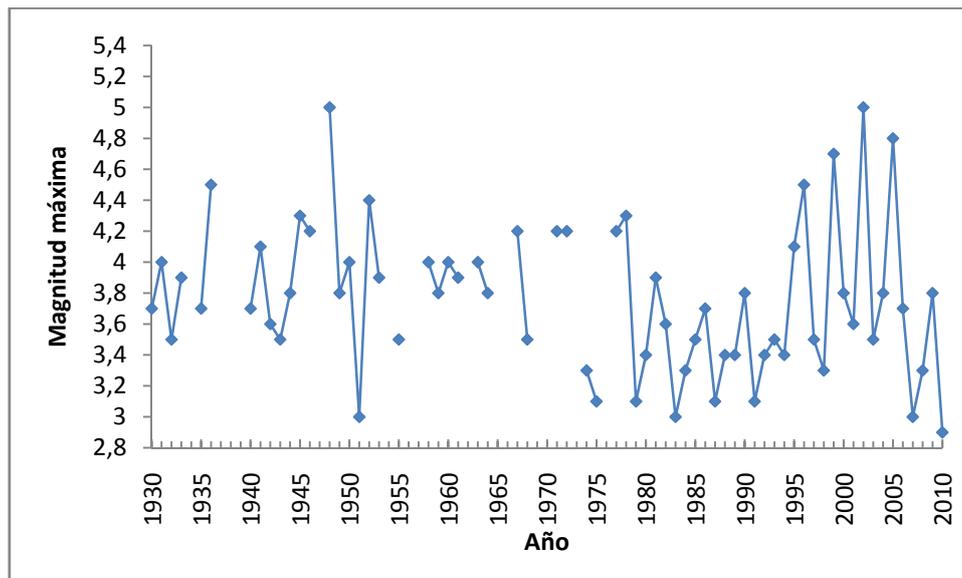


Figura 2.3. Distribución del número de terremotos para cada magnitud (periodo 1930-2010).

La figura 2.4 pone de manifiesto el amplio rango de magnitud máxima anual que se ha registrado en la zona. Ese rango abarca desde una magnitud 2.9, registrada como máxima en el año 2010, hasta el valor máximo de 5 que tuvieron los terremotos de 1948 y 2002. Por otro lado, llama la atención como entre los años 1996 y 2005 se produjeron cuatro terremotos con picos de magnitud cada tres años.



**Figura 2.4.** Distribución temporal de la máxima magnitud registrada desde el año 1930 para la zona de estudio.

De este periodo se pueden citar brevemente las características de los terremotos mas significativos.

### **Terremoto de Cehegín de 1948**

El 23 de junio se produjo un terremoto de magnitud 5,0 con epicentro al norte de Cehegín (Murcia). El sismo fue sentido ampliamente en las provincias de Murcia y Albacete, alcanzando el grado VIII (Rey Pastor, 1949) aunque posiblemente fue menor de grado VII. En Cehegín hubo que derribar por completo un pequeño barrio, aunque era de alta vulnerabilidad.

### **Terremoto de Lorca de 1977**

En mayo de 1977 fue instalada por el IGN una red de microsismicidad con objeto de estudiar la falla de Alhama de Murcia. El 6 de junio registró un terremoto de magnitud 4,2 ( $m_{bLg}$ ) con epicentro a unos 10 Km al SW de Lorca, y que fue sentido con una intensidad máxima de VI Debido a la existencia de la red temporal pudieron

determinarse 119 réplicas (Mezcua *et al*, 1984).

### **Terremoto de Mula de 1999**

El 2 de febrero se produjo un terremoto de magnitud 4,7 ( $m_{bLg}$ ) al norte de Mula (Murcia) y que fue tuvo un premonitorio ( $3,5m_{bLg}$ ) ocurrido 23 minutos antes. La serie tuvo 26 réplicas que duraron dos meses y solo dos de ellas superaron la magnitud 3, concretamente 3,3 y 3,6. La intensidad máxima sentida fue de VI, con el mayor daño reportado en las localidades de Mula, Las Torres de Cotillas y Campos del Rio. La aceleración pico registrada en la estación más próxima (Lorquí, 21 km) fue de 0,012g.

### **Terremoto de Bullas de 2002**

Este serie sísmica no tuvo ningún sismo premonitorio, sucediendo el principal el día 6 de agosto a las 06h16m con magnitud 5.0 ( $m_{bLg}$ ). Durante las primeras 24 horas se registraron 123 réplicas, de las cuales solo 24 superaron la magnitud 2,0 y tres de ellas la magnitud 3,0, llegando una réplica a alcanzar el valor de 3,9. Seguramente, la distancia relativamente alta del epicentro a la población hizo que la máxima intensidad sentida fuese solo de grado V, siendo las localidades de Bullas y Cehegín las que más lo percibieron. La máxima aceleración se registró en el equipo ubicado en Mula (a 32 km) con un valor de 0,020g.

### **Terremoto de La Paca de 2005**

El terremoto de 29 de enero, de magnitud 4,8 ( $m_{bLg}$ ) es el inicio de una larga serie que se puede considerar finalizada en el mes de septiembre. En las primeras 24 horas hubo 69 réplicas, de las cuales 13 superaron la magnitud 2,0 y solo una alcanzó el valor de 3,4. Dos réplicas más notables se sucedieron durante la misma semana, de magnitudes 4,3 y 4,0, siendo sentidas con intensidades IV-V y III-IV respectivamente. Las poblaciones más afectadas fueron La Paca y Zarzilla de Ramos, donde el sismo principal alcanzó el grado VII. El acelerógrafo instalado en Lorquí, alejado 50 km del epicentro, registro una aceleración pico de 0,032g.

## **2.2. MARCO GEOLÓGICO**

Los terremotos de Lorca de mayo 2011 han ocurrido en el sector oriental de la Cordillera Bética (recuadro de la figura 2.5.). Esta Cordillera constituye el extremo más occidental del cinturón orogénico Alpino y se ha generado a través de una compleja historia de episodios de colisión y separación entre las placas litosféricas Euroasiática y Africana. El proceso de acercamiento entre las citadas placas dio lugar a una colisión entre África y Europa de edad eocena y probablemente continuada hasta el Oligoceno. El esfuerzo producido por la colisión deformó la corteza y la engrosó mediante el apilamiento de grandes láminas de roca superpuestas, a la vez que se desarrollaban procesos térmicos que dieron lugar al metamorfismo visible en las rocas de las sierras

de la Cordillera (Sierra Nevada, Sierra de los Filabres, sierra de La Estancias, Sierra Espuña, etc.). Posteriormente, durante los tiempos más recientes, que denominamos neotectónicos (últimos 9 ó 10 millones de años), la situación de la región Bética entre la zona de interacción de ambas placas ha continuado produciendo un importante campo de esfuerzos y la consiguiente deformación de la corteza, si bien en un régimen tectónico diferente. En este nuevo marco se configura el paisaje actual de cuencas y sierras asociado a la actividad de numerosas fallas que hundien y levantan bloques de corteza.

Desde mediados de la década de los setenta comenzaron a estudiarse en detalle estas fallas, estableciéndose que sus direcciones principales son E-O, NE-SO y NO-SE y que afectan a rocas más recientes, del Plioceno y Cuaternario. Además se comenzó a analizar la relación de estas fallas con la sismicidad (Bousquet y Montenat, 1974; Bousquet, 1979; Sanz de Galdeano, 1980; Santanach et al., 1980; Sanz de Galdeano et al., 1982).

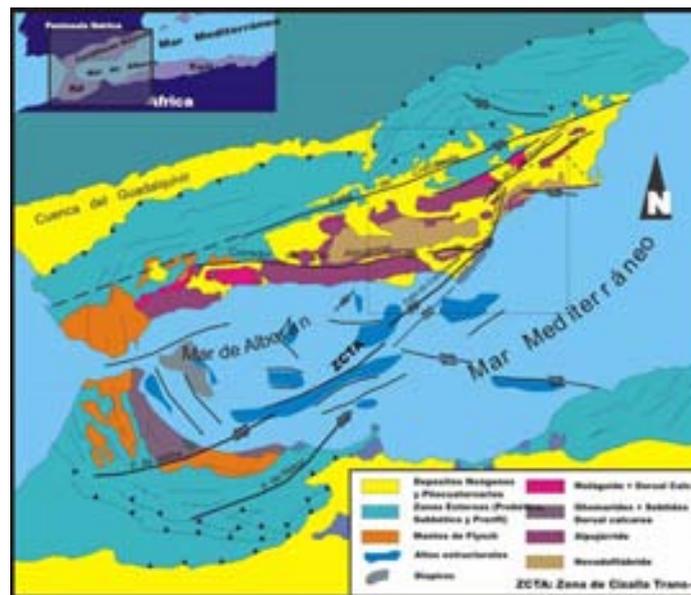
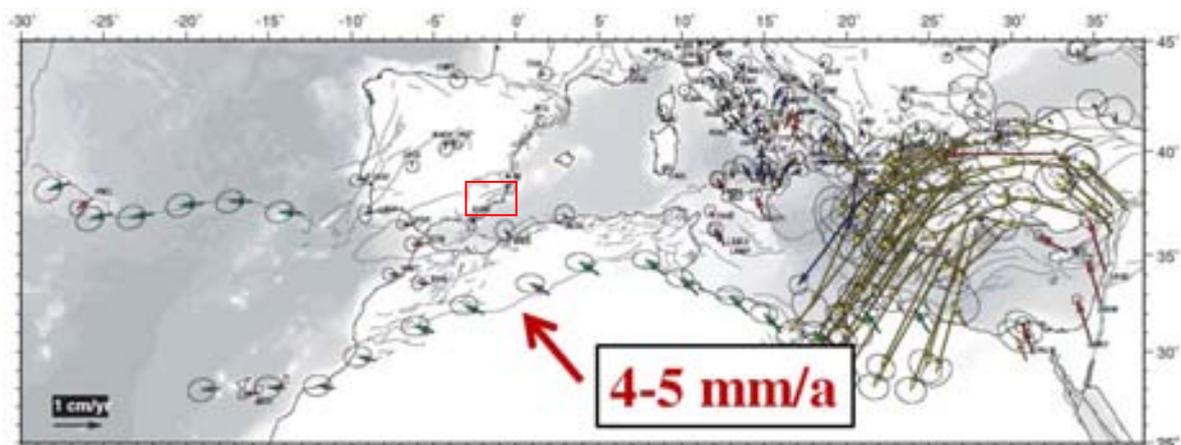


Figura 2.5. Mapa geológico de la Cordillera Bética y norte de África.

Desde los años 80 el desarrollo del conocimiento científico a nivel mundial en lo que se refiere a la relación entre la generación de grandes terremotos y las fallas activas cuaternarias se comenzó a aplicar a la Cordillera Bética y ha permitido identificar un buen número de fallas activas potencialmente generadoras de terremotos grandes (magnitud > 6.0). En el volumen de resultados de la reunión científica IBERFAULT: “Primera Reunión Ibérica Sobre Fallas Activas y paleosismología” ([http://www.iberfault.org/iberfault\\_2010/](http://www.iberfault.org/iberfault_2010/)) realizada el pasado año en colaboración entre la comunidad científica portuguesa y española, financiada por la Comunidad

Europea y el MICIN, puede consultarse una revisión de muchas de las fallas activas identificadas en el conjunto de Iberia, así como de los datos que de ellas se tienen en este momento. Actualmente está en marcha por parte del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) la creación de una base de datos de fallas activas en las que se pretende hacer accesible a la sociedad toda la información geológica que se obtenga de las fallas activas y que sea de utilidad para la gestión del riesgo sísmico.

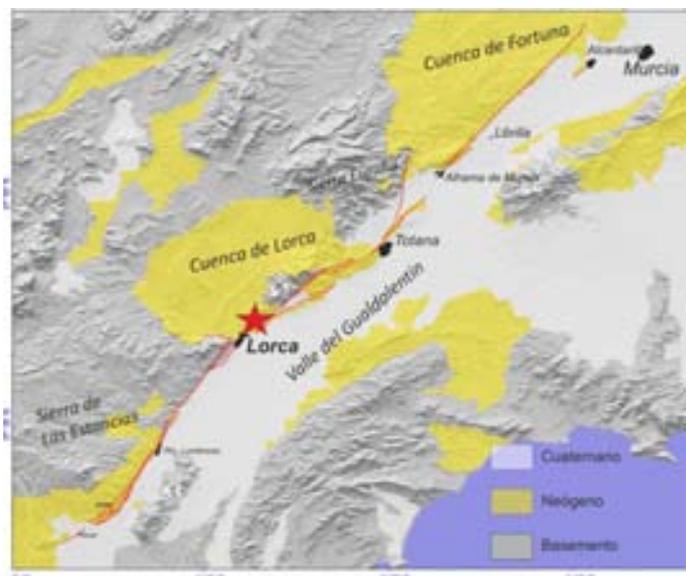
Los últimos datos procedentes de estaciones GPS indican que el acercamiento entre Eurasia y África en la actualidad es de unos 4-5 mm al año (Figura 2.6.). Esta convergencia produce una acumulación continua de esfuerzos en numerosas fallas activas existentes en el norte de África y sur de España. Un cierto número de estas fallas activas alcanzan grandes dimensiones y pueden cortar un espesor considerable de la corteza, de tal manera que el esfuerzo acumulado puede liberar energía suficiente como para generar terremotos de magnitudes importantes.



**Figura 2.6.** Modelo de distribución de velocidades de deformación de la región mediterránea. Tomado de Serpelloni et al. (2007). En la zona de interés (recuadrada en rojo) la velocidad a la que convergen las placas Euroasiática y Africana está entre los 4 y 5 mm/año. Esta escasa velocidad hace que las fallas activas en el entorno de la zona de Lorca sea inferior a 1 mm/a.

A una escala más local, la geología del sector oriental de la Cordillera Bética donde se produjo el terremoto de Lorca se caracteriza por la existencia de una sucesión de cuencas sedimentarias de edad terciaria y cuaternaria que forman las zonas de depresión y de valles (Cuencas de Lorca, y Fortuna, Valle del Guadalentín, Campo de Cartagena, etc.), que están separadas por una serie de sierras de pequeñas dimensiones como las sierras de Las Estancias, La Tercia, Almenara, Espuña y Carrascoy (ver figura 2.7). El levantamiento de estas sierras está en buena medida producido por la actividad de fallas sísmicamente activas. Los movimientos de estas fallas no se producen de forma continua y lenta si no que se dan mediante una. Dichos

terremotos, sin embargo, debido a la baja velocidad de acumulación de esfuerzos que presentan las fallas (generalmente inferiores a 1.0 mm por año) se producen a intervalos temporales muy elevados de cientos a miles de años. Por ello, tal y como se explicaba en el capítulo de sismicidad previo, en el periodo histórico no se han registrado grandes terremotos en las cercanías de Lorca. Sin embargo, los estudios geológicos en el terreno a través de la excavación de zanjas paleosísmicas y dataciones con métodos de datación numérica, sobre todo con Carbono 14, ha permitido identificar en las proximidades de Lorca paleoterremotos prehistóricos de magnitud > 6.5 (Masana et al., 2004; Martínez-Díaz et al., 2010) y lo mismo en otras grandes fallas del sureste de la península como la falla de Carboneras (Moreno et al., 2010); o la fallas de Socovos y de Tobarra (Rodríguez Pascua et al. 2008; Pérez-López et al., 2010), entre otras.

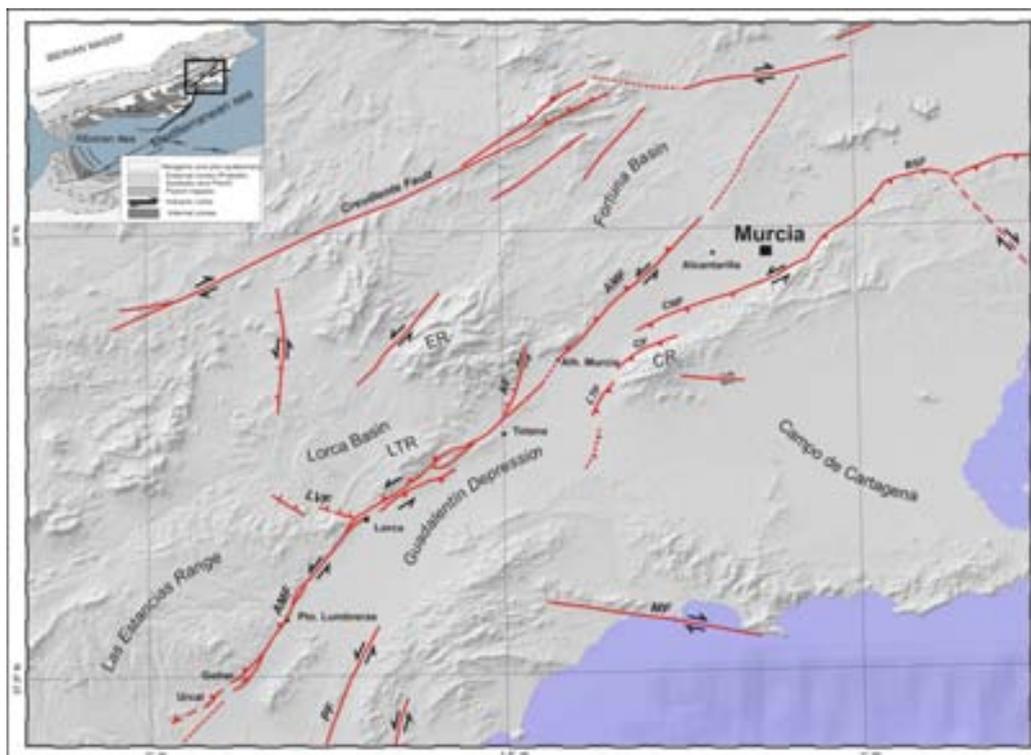


**Figura 2.7.** Mapa geológico del entorno de Lorca. Los colores muestran los tipos de material. El amarillo muestra los sedimentos de edad miocena, en blanco se señalan los depósitos cuaternarios que rellenan los valles, finalmente el gris se muestran las rocas antiguas pre-miocenas que forman las principales sierras.

Por otra parte, como se desarrolló en el capítulo de sismicidad, en los últimos 15 años se han producido algunas series sísmicas de magnitud moderada en la zona de Murcia como las de Mula de 1999 y las de Bullas y La Paca con magnitudes próximas a 5.0 que causaron daños significativos en edificaciones. Los estudios geológicos de esas series han aportado datos muy importantes para entender la peligrosidad y el riesgo asociados a estos terremotos de magnitud moderada (Benito et al., 2007) que indican que existen numerosas fallas en la zona capaces de generar estas magnitudes, y que además son probables los fenómenos de interacción entre ellas, es decir, que un terremoto generado en una falla puede inducir otro en una falla diferente y próxima.

En el mapa de la figura 2.8. se muestran las principales fallas activas que se han

identificado en el entorno de Lorca y que pueden ser potencialmente generadoras de terremotos de magnitud  $> 5.0$ . Futuros estudios de paleosismología en las mismas permitirán aumentar el conocimiento acerca de su potencial y su probabilidad de reactivación. Las fallas con mayor potencial para producir terremotos importantes son aquellas de mayor longitud, ya que la magnitud de un terremoto depende directamente de la longitud de ruptura de la falla que lo genera. Como puede apreciarse en este mapa, la localidad de Lorca se sitúa justo sobre la traza de una de estas fallas denominada Falla de Alhama de Murcia. Si observamos la cartografía geológica de la zona a una escala más detallada (Figura 2.9.) podemos ver que la estructura de la falla de Alhama de Murcia en la zona de Lorca es bastante compleja, con varias ramas que pasan muy próximas a la ciudad. Esta falla separa el valle del río Guadalentín situado al sureste de las sierras de La Tercia y Las Estancias situadas al noroeste. La actividad de esta falla durante los últimos 2 ó 3 millones de años ha producido el levantamiento de las sierras al noroeste y el hundimiento del valle al sureste, estando situada la ciudad de Lorca en las laderas de una de esas sierras levantadas. En el capítulo 5 de Geología del Terremoto se utilizará este marco geológico local para interpretar el tramo concreto de falla responsable del terremoto y sus efectos geológicos.



**Figura 2.8.** Mapa de las principales fallas activas del SE de la Cordillera Bética. AMF: Falla de Alhama de Murcia; LVF: Falla de Las Viñas; PF: Falla de Palomares; MF: Falla de Las Moreras; AF: Falla de Amarguillo; LTF: Falla de Los Tollos; CF: Falla de Carrascoy; CNF: Falla de Cañarico; BSF: Falla del Bajo Segura; (Martínez Díaz et al., 2010).

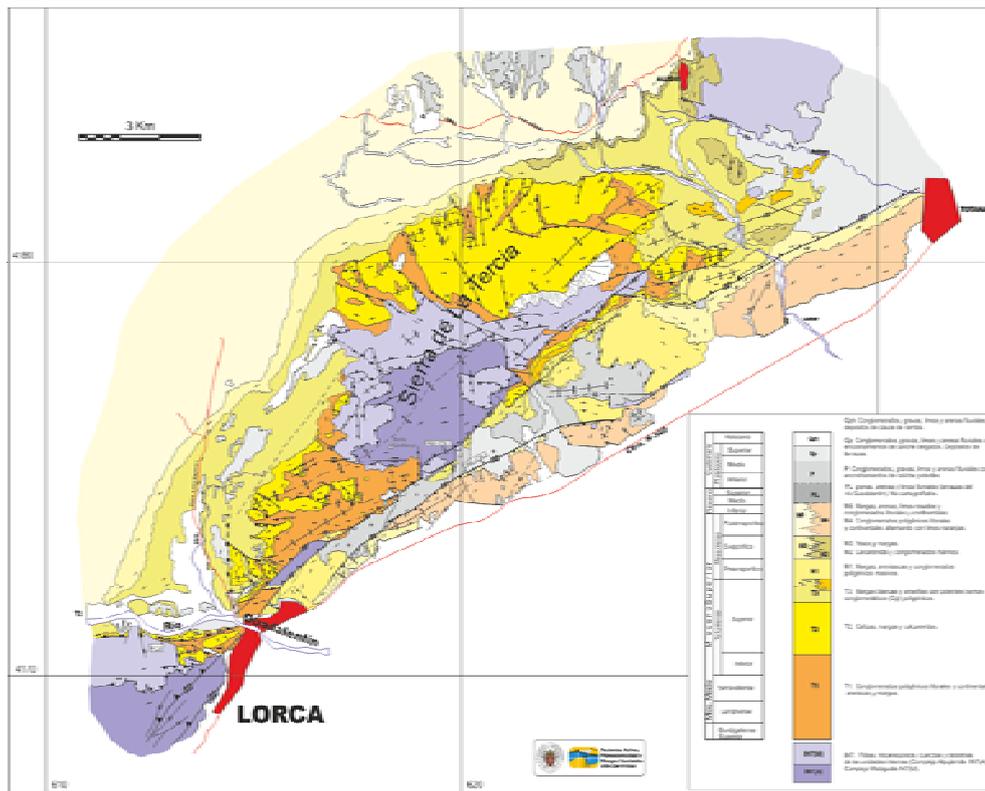


Figura 2.9. Mapa geológico de la zona de Lorca (Martínez Díaz, 1998).

## 2.3. PELIGROSIDAD SISMICA DE LA REGION DE MURCIA

### 2.3.1. Introducción

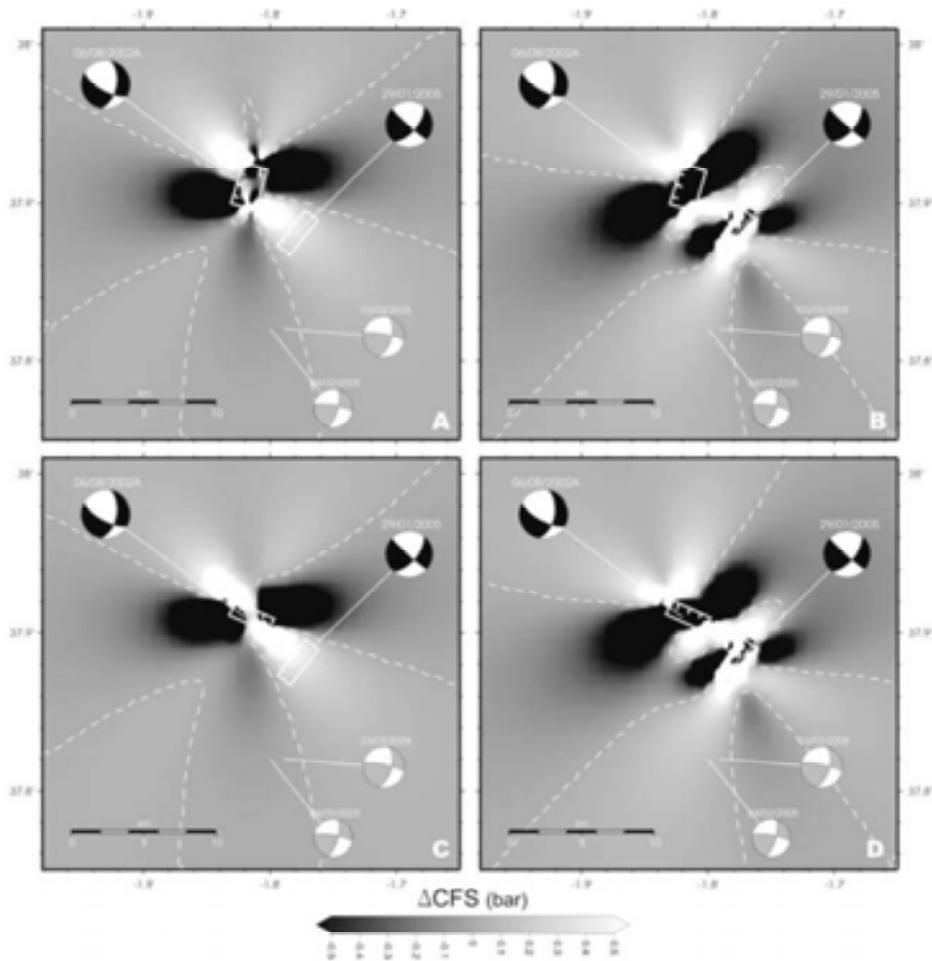
El terremoto ocurrido en Lorca el 11 de mayo de 2011, tuvo lugar en una zona donde sismos relativamente frecuentes con baja y moderada magnitud causan un daño significativo. Ocasionalmente, esos terremotos están agrupados en cortos intervalos de tiempo. Es el caso de los cuatro sismos ocurridos en la provincia de Murcia con importantes efectos en Mula (1999), Bullas (2002), La Paca (2005) y Lorca (2011). En un plazo de 12 años han tenido lugar cuatro eventos que, conjuntamente, han causado los mayores daños reportados por terremotos en España en las últimas décadas.

Un posible *mecanismo de disparo* puede ser la explicación de estos sismos con tanta frecuencia en tan corto intervalo de tiempo, y así parece confirmarse en el caso de los sismos de Bullas (2002) y La Paca (2005), como se muestra en la Figura 2.10. Este mecanismo, promovido por la existencia de alta densidad de fallas con actividad neotectónica, parece ser común en la zona (Benito et al 2007; Santoyo y Luzón, 2008). Los *mecanismos de disparo* tienen importantes implicaciones en el establecimiento de

la peligrosidad sísmica de una región. Las relaciones causa-efecto observadas hacen crecer la probabilidad de ocurrencia de futuros terremotos en aquellas zonas donde los esfuerzos estáticos han crecido tras los sismos previos. Este hecho, unido al daño evidenciado por terremotos de baja magnitud en la región, confiere un importante riesgo sísmico a la región, entendiendo el riesgo (de forma simplificada) como la probabilidad de daño en estructuras y personas condicionada a la probabilidad de ocurrencia de movimientos en el área circundante.

La amplificación local del movimiento sísmico (quizá junto una con posible directividad de la ruptura) y la relativamente elevada vulnerabilidad de las estructuras, parecen explicar el daño observado como factores dominantes (Benito et al., 2007). Así, terremotos pequeños, de Mw entre 4.7 y 5.1, han generado daños de grados 2 y 3 e intensidades 6 y 7 en la escala Europea EMS-98, lo que se concibe como daño moderado en una escala con 5 grados de daño y 12 grados de intensidad. Algunos edificios recientes, construidos al amparo de las últimas normativas han sufrido daños significativos, lo que lleva a cuestionar los niveles de movimiento previstos en dichas normativas, preguntándonos si éstos resultan o no conservadores, y qué lecciones debemos extraer hacia la edición de una nueva normativa.

Con este objetivo efectuamos una revisión de los estudios de peligrosidad sísmica en los que aparece la región de Lorca, entendiendo por peligrosidad la probabilidad de que se igualen o superen niveles de movimiento con cierta aceleración en un determinado periodo de tiempo. Para fines de diseño antisísmico, la mayor parte de las normativas - incluida la española - consideran los movimientos con probabilidad del 90 % de no ser excedidos en 50 años para el cálculo de viviendas convencionales, es decir, movimientos con un 10 % de probabilidad de excedencia en ese periodo, que se considera como el tiempo de vida útil de la estructura. El 10 % se asume como margen de riesgo con criterios de rentabilidad. Este porcentaje varía dependiendo de la importancia de la estructura, y ello condiciona la probabilidad para la que se calcula el movimiento a tener en cuenta en el diseño. Para estructuras de especial importancia, como edificios públicos, hospitales, etc, se adopta un criterio más conservador y se asume solo un 2 % de excedencia del nivel de movimiento en 50 años, lo que supone considerar mayores movimientos en el diseño de las correspondientes edificaciones. El caso extremo corresponde a estructuras críticas, como centrales nucleares, para las que solo se admiten probabilidades mínimas de excedencia de los movimientos para los que son diseñadas, siendo estos movimientos mayores que los que regulan las viviendas convencionales y mucho menos probables. El concepto de peligrosidad, entendido como “movimiento probable” es, por tanto, flexible y depende de la aplicación final a la que se dirija el correspondiente estudio.



**Figura 2.10.** Modelos de cambio de esfuerzos estáticos de Coulomb (CFS) generados tras los eventos de 2002 y 2005. La línea discontinua representa la línea en la que no hay cambio de esfuerzos. (a) y (b) Representan cambios de CFS producidos en planos noreste–suroeste (paralelos a la falla asumida como fuente del sismo de 2005) a causa de las dos posibles soluciones de planos de ruptura del evento de 2002. (c) y (d) Cambios de CFS producidos por los sismos principales de las series de 2002 y 2005 en planos orientados óptimamente bajo el patrón de esfuerzo actual. Todos los modelos se han calculado para una profundidad de 3 km (como el sismo principal de 2005). Se evidencia que el sismo de 2005 ocurrió en una zona cargada de esfuerzos tras el sismo de 2002, por lo que pudo ser disparado por éste.

Por otra parte, el movimiento en un cierto sitio o emplazamiento depende decisivamente de las condiciones locales del mismo, es decir de la estructura y composición geológica del sub-suelo y de la topografía, condiciones que pueden multiplicar por un factor de 2 o más al movimiento incidente en roca y terreno llano, por lo que en muchos casos son responsables de los mayores daños observados. Para tener en cuenta este importante efecto, generalmente la peligrosidad se determina calculando primero el movimiento en roca e incluyendo después el factor de amplificación dependiendo de las condiciones locales del suelo en cuestión. Por ello diferenciamos los conceptos de “*aceleración en roca*” y “*aceleración en suelo*”, siendo la segunda la que incluye el denominado efecto local y la que debe ser introducida en los cálculos dinámicos de las estructuras con fines de diseño.

Con todo, la peligrosidad de una zona indica el movimiento con cierta probabilidad de

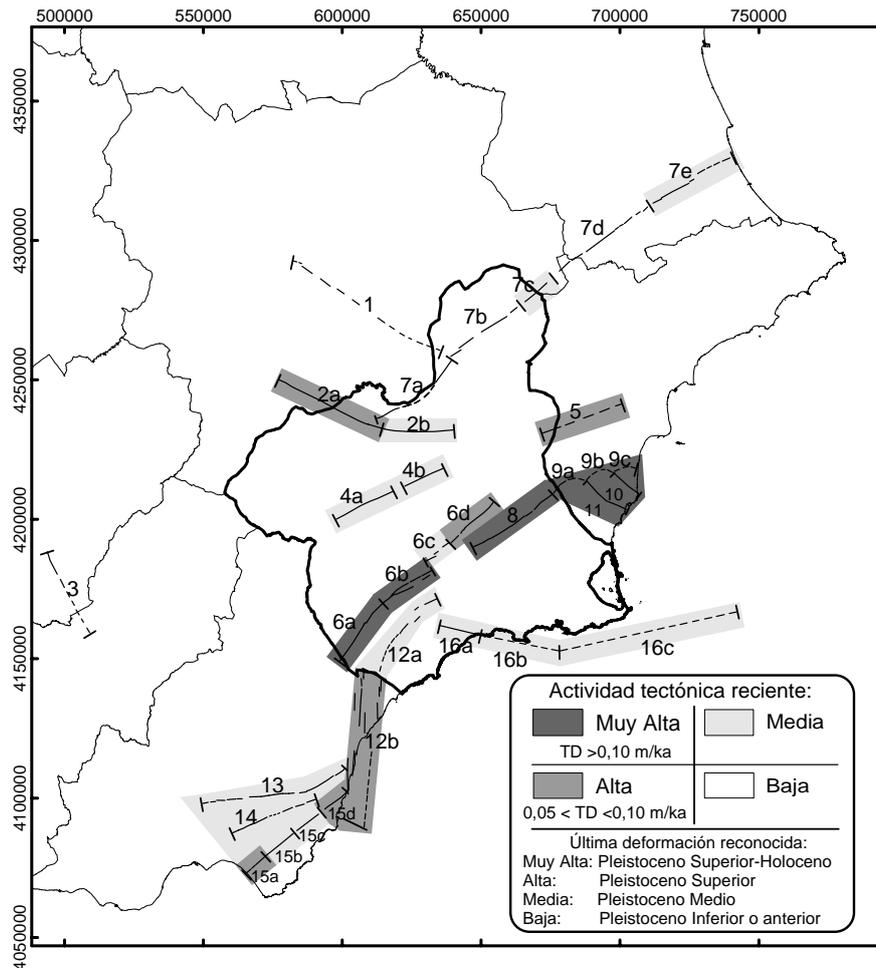
excedencia que se puede esperar como consecuencia de todos los sismos que ocurrirán en el área de influencia, pero no corresponde a un sismo en particular. El sismo dominante que más contribuye a ese movimiento, denominado *sismo de control*, puede determinarse por medio de lo que denominamos desagregación de la peligrosidad.

Por último, el diseño sismorresistente requiere representar el movimiento no solo a través de la aceleración máxima del terreno, conocida generalmente como PGA (del inglés Peak Ground Acceleration), sino por medio de un diagrama completo de amplitudes en función de la frecuencia denominado *espectro de respuesta*, lo que requiere estimar, además de la PGA, las ordenadas espectrales para diferentes periodos del movimiento SA (T). Dicho espectro es derivado generalmente en las normativas, incluida la española, a partir de la aceleración máxima en roca, introduciendo factores de amplificación local dependientes del tipo de suelo y factores de importancia de la estructura a diseñar (equivalentes a establecer un cierto nivel de probabilidad) y considerando formas espectrales estándar que se escalan con la aceleración máxima en suelo. El espectro de respuesta que se introduce en el diseño depende, por tanto, de la aceleración máxima en roca, de los coeficientes de amplificación del suelo adoptados y de las formas espectrales propuestas en la normativa.

Aclarado lo anterior, se revisan a continuación los estudios de peligrosidad realizados hasta la fecha en la provincia de Murcia y en particular en la zona de Lorca, expresando la peligrosidad en términos de *aceleración en roca*, *aceleración en suelo*, *sismos de control* y *espectros de respuesta*. De esta revisión extraemos al final conclusiones dirigidas a tomar acciones para aumentar el estado del conocimiento en la zona e incorporarlo a la revisión de la normativa.

### **2.3.2. Condicionantes sismotectónicos**

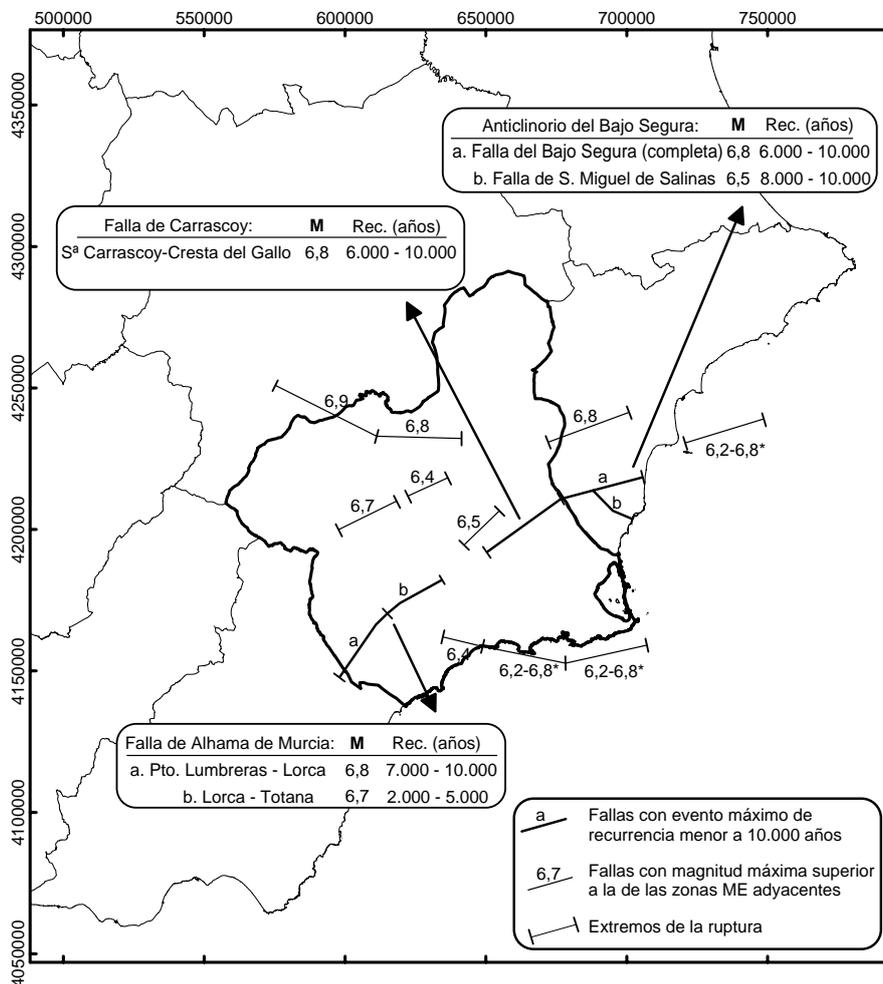
La peligrosidad de la región de Murcia se explica por la existencia de grandes fallas con actividad geotectónica, como se ha explicado con detalle en el apartado 2.2. Estas conforman una zona de deformación (zona de falla) de ancho variable, normalmente entre 1 y 5 km, que se reconoce en superficie por longitudes de al menos 30 km, superando con frecuencia los 50 km, y llegando excepcionalmente a 100 km en casos extremos (Figura 2.11.). Casi todas las grandes fallas se pueden compartimentar en segmentos tectónicos diferenciados, que pueden presentar longitudes desde los 10-15 km hasta unos 40 km en las fallas más continuas, siendo estas longitudes determinantes en la magnitud de los terremotos que pueden ocurrir.



**Figura 2.11.** Grandes Fallas del Sureste de España (Cordilleras Béticas Orientales). Se indican los diferentes segmentos tectónicos que componen cada gran falla, así como su grado de actividad tectónica reciente. Adaptado de García-Mayordomo (2005). 1: Pozohondo-Tobarra, 2: Socovos-Calasparra (a: Central, b: Línea Eléctrica), 3: Tíscar, 4: Crevillente (Sector Murcia) (a: Campo Coy-Bullas, b: Bullas-S<sup>a</sup> Ricote), 5: CreCOvillente (Sector Alicante) (Abanilla-Río Vinalopó), 6: Alhama de Murcia (a: Puerto Lumbreras-Lorca, b: Lorca-Totana, c: Totana-Alhama, d: Alhama-Alcantarilla), 7: Jumilla (Sectores Murcia y Valencia) (a: Calasparra-Jumilla, b: Jumilla-Yecla, c: Yecla-Caudete, d: Caudete-Xátiva, e: Xátiva-Tavernes), 8: Carrascoy, 9: Bajo Segura (a: Hurchillos, b: Benjúcar, c: Guardamar), 10: Torrevieja, 11: San Miguel de Salinas, 12: Palomares (a: Almenara- Hinojar, b: Carboneras-Almenara), 13: Corredor de Las Alpujarras, 14: Alhamilla, 15: Carboneras (a: Rambla Morales, b: Serrata, c: El Argamasón, d: Carboneras), 16: Las Moreras-Escarpe de Mazarrón (a: Las Moreras, b: Puerto de Mazarrón-Este de Cabo Tiñoso, c: Este de Cabo Tiñoso-Este de Cabo de Palos).

Según García Mayordomo (2005), las grandes fallas de la Región de Murcia pueden clasificarse en cinco grupos según su actividad tectónica reciente reconocida: “Muy Baja”, “Baja”, “Media”, “Alta” y “Muy Alta”. Las clases “Muy Baja” y “Baja” califican fallas en las que no se han reconocido deformaciones en depósitos del Cuaternario o posteriores al Pleistoceno Inferior, respectivamente, cuyos procesos geomorfológicos asociados indican poca actividad. Las fallas de clase “Media” presentan procesos geomorfológicos asociados a indicadores de cierta actividad, siendo la edad de la última deformación reconocida, al menos, el Pleistoceno Medio. La clase “Alta” se

corresponde con fallas que deforman depósitos de edad mínima el Pleistoceno Superior y presentan tasas de deslizamiento entre 0,05-0,10 m/ka (metros /1000 años). La clase “Muy alta” la forman fallas con tasas de deslizamiento superiores a 0,10 m/ka y con deformaciones reconocidas en materiales del Pleistoceno Superior y en algunos casos del Holoceno. Las fallas con mayor grado de actividad reciente en la Región de Murcia son las fallas de Alhama de Murcia y Carrascoy, si bien fuera del territorio murciano también hay que destacar la Falla del Bajo Segura y las fallas de San Miguel de Salinas y Torrevieja (Alicante), con posibles efectos en la provincia de Murcia. Estas estructuras son responsables de la sismicidad de la zona, que es de baja-moderada magnitud pero con relativa alta frecuencia. La magnitud máxima estimada en cada falla y el periodo de recurrencia medio son indicados en la Figura 2.12.



**Figura 2.12.** Magnitudes máximas y recurrencias medias estimadas para las grandes fallas de la región de Murcia con periodo de recurrencia inferior a 10.000 años. En el resto de las grandes fallas se indica únicamente la magnitud máxima posible. Estas fallas no tienen influencia significativa en la peligrosidad para periodos de retoro inferiores a su periodo de recurrencia, pero deberían considerarse en análisis deterministas de la peligrosidad o en probabilistas para muy bajas probabilidades de excedencia. Tomado de García-Mayordomo (2005).

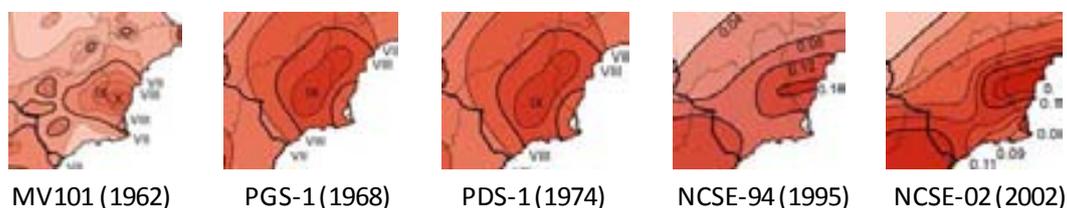
En la Tabla 2.2. se resumen los valores de magnitud máxima y periodo de recurrencia estimados para cada falla de la provincia de Murcia y alrededores.

**Tabla 2.2.** *Parámetros sísmicos de las grandes fallas de la provincia de Murcia (tomado de García-Mayordomo, 2005).*

Falla	Segmento	M <sub>w</sub>	Rec. media
Alhama de Murcia	Pto. Lumbreras – Lorca	6,8	7.000 años
	Lorca-Totana	6,7	2.000 años
Carrascoy	S <sup>a</sup> Carrascoy – Cresta del Gallo	6,8	6.000 años
Bajo Segura	Hurchillo	6,3	1.700 años
	Benejúzar	6,2	2.000 años
	Guardamar	6,1	3.000 años
San Miguel de Salinas	La Veleta – Río Segura	6,5	8.000 años

### 2.3.3. Aceleración en roca

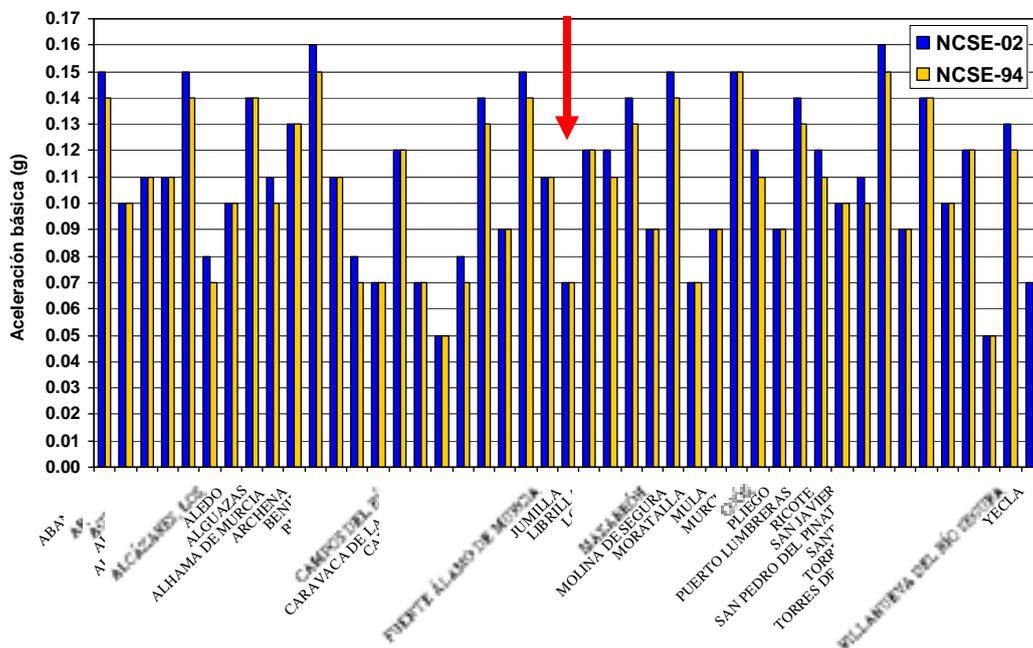
Los primeros trabajos de peligrosidad sísmica que comprenden la Región de Murcia se deben a Munuera (1969) y sirvieron de base para la realización de los mapas de las primeras normas sismorresistentes españolas de PGS-1 (1968) y PDS-1 (1974). Desde entonces, se han desarrollado numerosos estudios por parte de otros tantos autores, con diferentes metodologías y propósitos de aplicación, dando como resultados en Lorca aceleraciones en roca en el rango de 0.12 g a 0.24 g para los movimientos esperados con probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años, movimientos comparables a los establecidos en la normativa. La figura 2.13. muestra los mapas de peligrosidad según diferentes normativas desde 1962 hasta la fecha actual.



**Figura 2.13.** *Mapas de peligrosidad de la Región de Murcia según las diferentes normativas sismorresistentes españolas. Los tres primeras están dados en términos de intensidad macrosísmica y los dos últimos en aceleración básica en suelo firme.*

En las dos últimas ediciones de la Normativa sismorresistente Española, NCSE-02 y

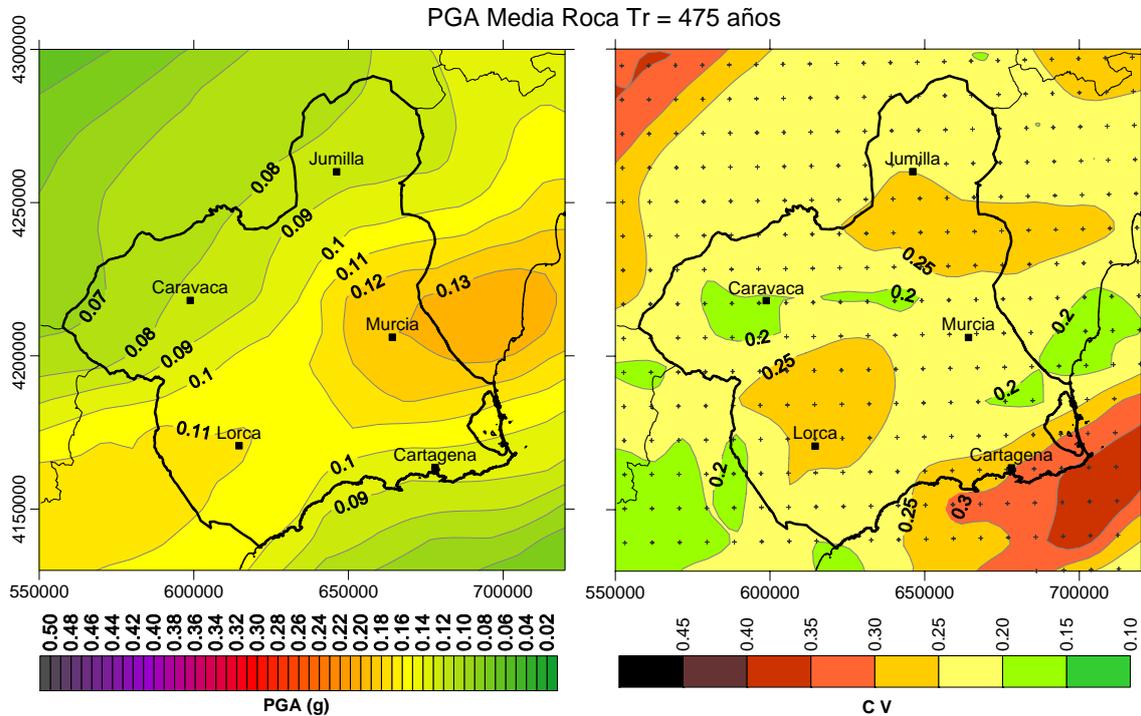
NCSE-94 la peligrosidad se expresa por medio de la aceleración básica,  $a_b$ , (definida como una aceleración horizontal característica de la superficie del suelo con 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años). Los valores de este parámetro en los diferentes términos municipales de la región son muy similares, variando en décimas en algunas poblaciones. En la Figura 2.14. se comparan los valores de  $a_b$  dados en ambas normativas, pudiendo comprobarse que en Lorca no hay variación. En ambas se adopta un valor de 0.12 g, que es algo menor que los obtenidos en los estudios de Buforn *et al.* (2005), Crespo (2011) y García Blanco (2009) (luego publicado como Mezcua *et al.*, en prensa) pero es similar al estimado en el proyecto RISMUR (Benito *et al.* 2006a), en el que se hizo un estudio completo de riesgo sísmico que sirvió de base para el plan SISMIMUR. Este es el plan de emergencias de Protección Civil que se activó con el terremoto de Lorca del 11 de marzo de 2011. En este estudio, además de determinar la aceleración esperada se estimó también la incertidumbre de la estimación, expresada a través del coeficiente de variación, COV, que da una medida de la variabilidad del parámetro representado en función de las opciones de entrada al cálculo. Se puso de manifiesto que, con el control de la sismicidad y tectónica existente de la región, la incertidumbre en Lorca es máxima entre las encontradas en la provincia.



**Figura 2.14.** Valor de aceleración básica en las normas NCSE-94 y NCSE-02 en diversas localidades murcianas, indicándose Lorca con la flecha roja.

La figura 2.15. muestra el mapa de peligrosidad sísmica en términos de aceleración máxima en roca obtenido en el proyecto RISMUR, junto con el mapa de coeficiente de variación, COV (Benito *et al.* 2006b). Los resultados con menor valor de COV son más

robustos, es decir menos dependientes de las opciones consideradas. En Lorca se obtienen valores de COV de 0.25, lo que significa que la aceleración de 0.12 g representada presenta variabilidad de un 25 %.



**Figura 2.15.** Mapa de valores medios de PGA en roca para 10 % de probabilidad de excedencia (izquierda) y del coeficiente de variación correspondiente (derecha), que da idea de la incertidumbre de la estimación.

Un hecho destacable de todos los estudios realizados es que en ninguno de ellos, salvo en el proyecto RISMUR de forma colateral, se han considerado las fallas como unidades independientes en el cálculo de la peligrosidad, habiéndose realizado éste únicamente a partir de la actividad de zonas más amplias o bien directamente a partir de la sismicidad observada. Este hecho se traduce en la reducción de la peligrosidad en la proximidad de las fallas, que se diluye en las mayores zonas consideradas. Una mejora indudable en futuros estudios de peligrosidad se obtendría con la modelización de fallas y su introducción en el cálculo como unidades independientes, de modo que las aceleraciones predichas en la proximidad de tales fallas fueran más realistas.

### 2.3.4. Curvas de Peligrosidad

Las curvas de peligrosidad representan los valores del parámetro del movimiento elegido para diferentes probabilidades anuales de excedencia. En el proyecto RISMUR se estimaron estas curvas en Lorca sobre un emplazamiento genérico en roca (Benito et al 2006b), representando el movimiento en términos de aceleración máxima y ordenadas espectrales SA(T) para periodos T= 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 2 segundos (Figura

2.16.). Con estas aceleraciones espectrales SA(T) se construye después el espectro de respuesta a incluir en el diseño.

La línea punteada azul indica los valores obtenidos para la probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años, que es la probabilidad de referencia adoptada en la NCSE-02. Para esa probabilidad, la aceleración máxima (PGA) es de 0.12 g, similar a la aceleración básica propuesta en la NCSE-02. La aceleración registrada en el terremoto del 11 de mayo en la estación de Lorca, 0.37 g, corresponde según este estudio a una probabilidad anual algo inferior a  $10^{-4}$ , lo que supone una probabilidad de excedencia del 0.01% en 50 años, muy inferior a la que usualmente se considera en la normativa. Con esta aceleración, estaríamos en el caso del 10 % de probabilidad de excedencia asumido para viviendas convencionales, estando en el límite de lo que se asume habitualmente para centrales nucleares.

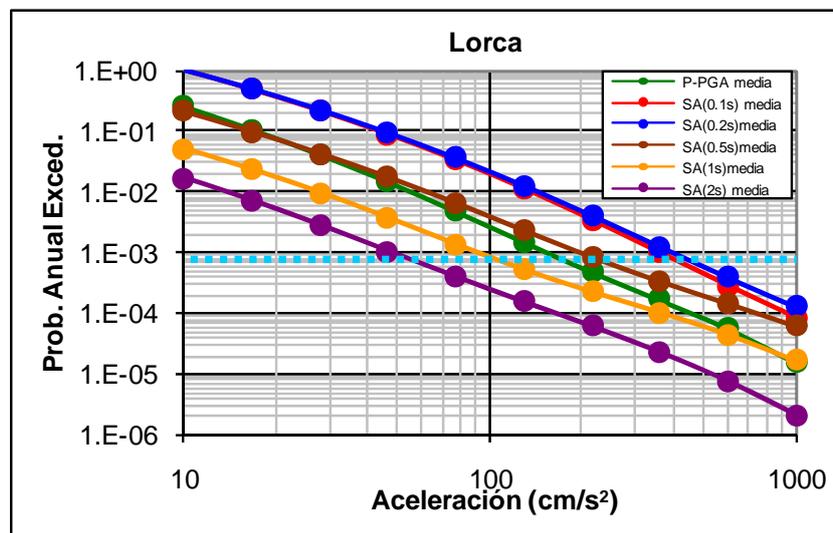
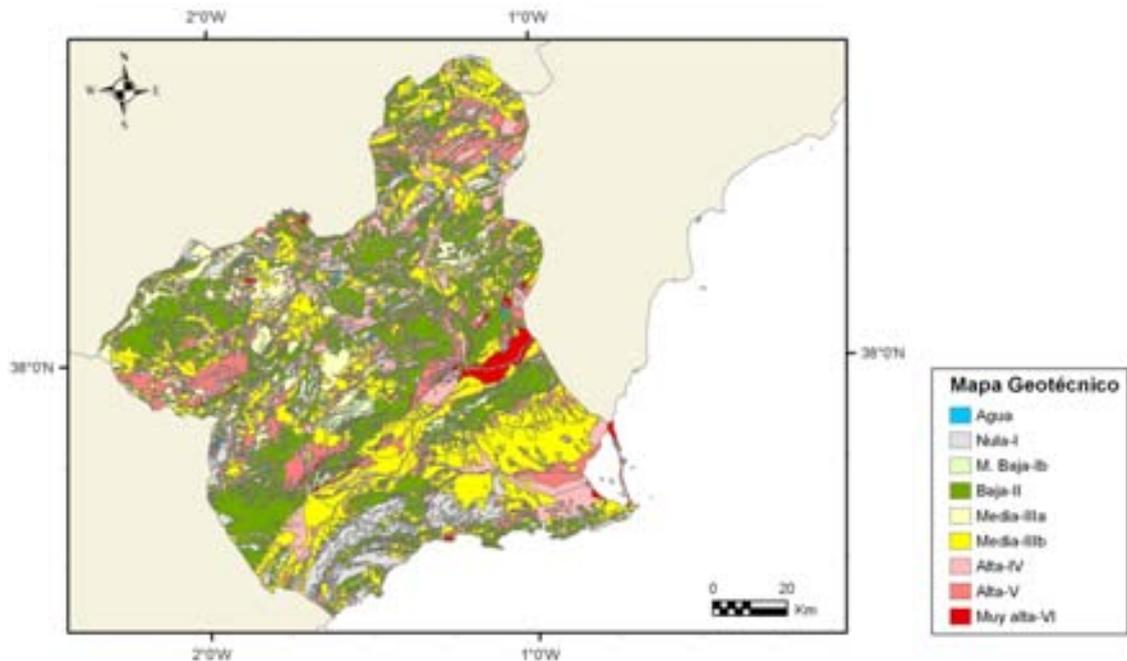


Figura 2.16. Curvas de peligrosidad para un emplazamiento rocoso situado en la ciudad de Lorca. La línea punteada representa la probabilidad anual de excedencia equivalente a la excedencia del 10 % en 50 años.

### 2.3.5. Aceleración en suelo

Los mapas anteriores muestran la aceleración máxima en roca sin incluir el efecto local. La Norma Española no proporciona mapas de aceleración en suelo, sino que establece los criterios para incluir este efecto en el emplazamiento de cada estructura a diseñar. Una idea de la variabilidad de suelos en la provincia de Murcia y de las posibles aceleraciones esperadas incluyendo el efecto local puede extraerse de los resultados del proyecto RISMUR (Benito et al. 2006c; Benito et al. 2008). En este proyecto se clasificaron los suelos de la provincia atendiendo a su comportamiento ante el sismo (Figura 2.17.) y se asignaron factores de amplificación a cada tipo sobre

la aceleración previamente estimada en roca, siendo estos factores del mismo orden que los incluidos en la NCSE-02, con un valor máximo de 2 para los suelos mas blandos. Finalmente, se obtuvieron mapas de aceleración en suelo, incluyendo ya el efecto local (Figura 2.18), combinando los factores y mapas anteriores.



**Figura 2.17.** Mapa geotécnico de la región de Murcia, diferenciando zonas en función del grado de amplificación del movimiento sísmico esperado.

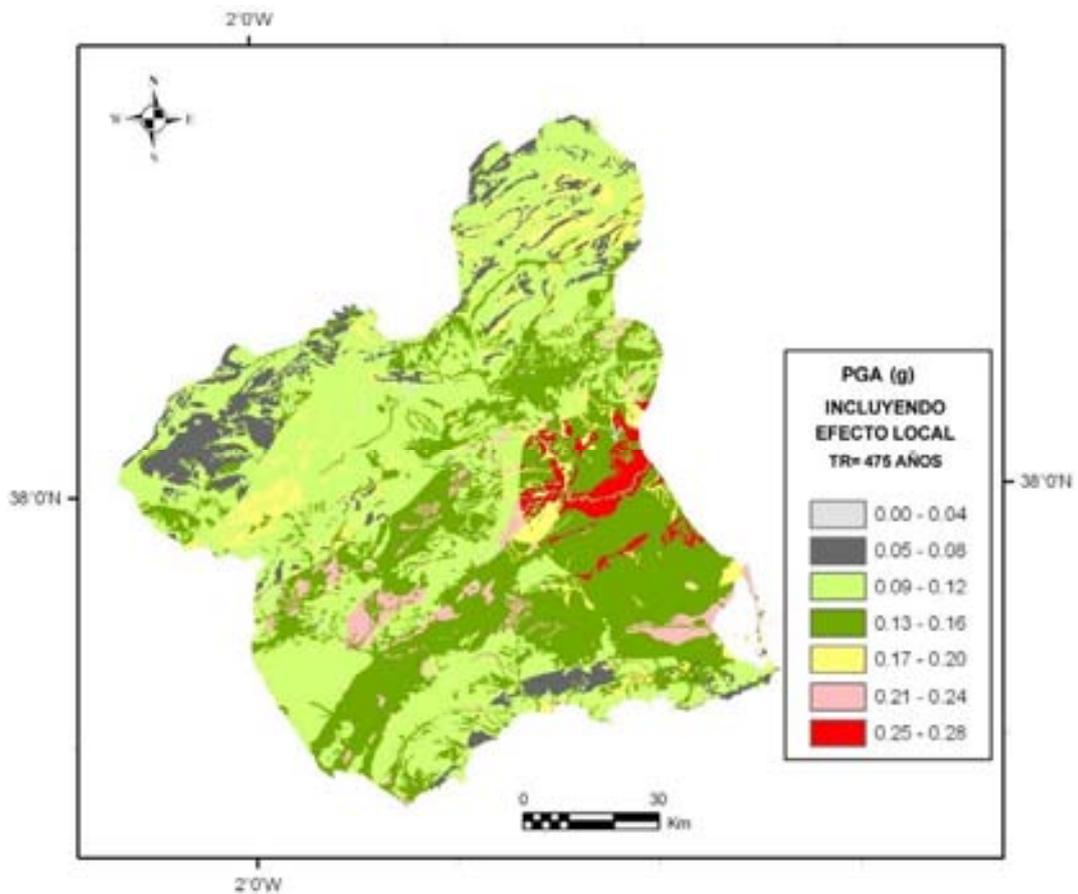
Los suelos de Lorca presentan variabilidad en la amplificación, que puede ser baja, media o alta dependiendo de la zona, aunque en la mayor parte del municipio es baja.

### 2.3.6. Sismos de control dominantes en la peligrosidad

La estimación de peligrosidad en una zona indica el movimiento con cierta probabilidad de excedencia que se puede esperar como consecuencia de todos los sismos que ocurrirán en el área de influencia, pero no corresponde a un sismo en particular. El sismo dominante que más contribuye a ese movimiento, denominado sismo de control, puede determinarse por medio de lo que denominamos desagregación de la peligrosidad.

El estudio de desagregación en Lorca, dentro del proyecto RISMUR, permitió identificar los sismos de control para la probabilidad de referencia del 10 % en 50 años, dando concretamente el rango de magnitudes y distancias fuente-emplazamiento de dichos terremotos (Benito *et al* 2006a). Los resultados se muestran en la tabla 2.3., poniendo de manifiesto que para la aceleración máxima y la ordenada espectral de corto periodo SA (0.1s) el sismo que más contribuye es un sismo moderado con  $M_w$  en el rango de

4.5 a 5 y próximo, entre 0 y 10 km de distancia epicentral. El sismo ocurrido en Lorca está prácticamente dentro de este rango de magnitudes y distancias, es decir, coincide con el sismo de control para la probabilidad asumida.



**Figura 2.18.** Mapa de valores medios de PGA incluyendo el efecto local para 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años.

**Tabla 2.3.** Sismos de control deducidos en Lorca para 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años (Proyecto RISMUR).

LORCA			
Movimiento objeto (cm/s <sup>2</sup> )		Δ Magnitud	Δ Distancia (km)
PGA <sub>475</sub>	111	(4.5 - 5.0)	0 - 10
SA <sub>475</sub> (0.2 s)	278	(4.5 - 5.0)	0 - 10
SA <sub>475</sub> (1 s)	62	(5.5 - 6.0)	10 - 20

### 2.3.7. Espectros de respuesta

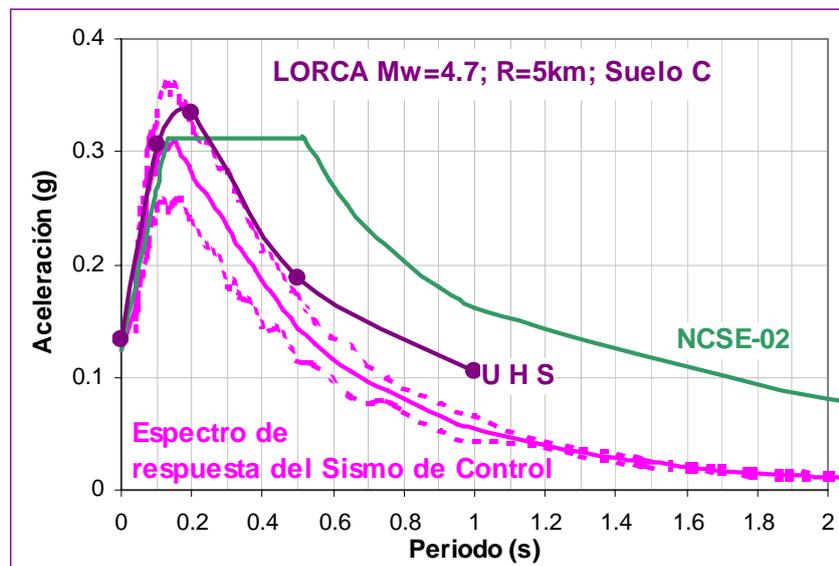
La figura 2.19. muestra los espectros de respuesta del movimiento esperado con 10 %

de probabilidad de excedencia en 50 años en un suelo promedio tipo II, que según la NCSE-02 corresponde a roca muy fracturada y terrenos granulares densos o cohesivos duros, con velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla entre 400 y 750 m/s, y es el suelo dominante en Lorca. Junto con el espectro dado por la NCSE-02, que regula el diseño de viviendas convencionales, se representan dos tipos de espectros obtenidos en el proyecto RISMUR:

- UHS, espectro de probabilidad uniforme (todas las ordenadas espectrales corresponden a la misma probabilidad de excedencia).
- Espectros específicos del sismo de control para corto periodo, con magnitud en el rango  $M_w$  (4.5-5) y distancia  $R$  (0-10 km).

El espectro de la NCSE-02 resulta muy conservador para largo periodo ( $T > 0.4$  s) y es ligeramente excedido por alguno de los espectros del proyecto RISMUR para corto periodo ( $T < 0.4$  s). Todos están muy por debajo del registrado en la estación de Lorca en el sismo del 11 de mayo de 2011, lo que podría contribuir a explicar el daño causado especialmente en viviendas de entre 1 y 5 plantas, con periodo fundamental de vibración en el rango de los cortos periodos.

Asimismo, el estudio de las formas espectrales de terremotos recientes (incluyendo los de la serie de Lorca 2011) apunta a unas conclusiones similares en cuanto a la excedencia de las formas espectrales de la normativa en los cortos periodos (Gaspar-Escribano y Benito 2007) y lo mismo sucede con los espectros del Eurocode 8 (tipo 2). Sin embargo los espectros del Eurocode 8 (tipo 1) y del International Building Code (Gaspar-Escribano *et al.* 2008), ajustan mejor a los obtenidos particularmente para la región en diferentes estudios.



**Figura 2.19.** Resumen de los diferentes espectros calculados para Lorca en el tipo de suelo dominante (Tipo II en la clasificación de la NCSE-02): Espectro específico de respuesta asociado al sismo de control (se representan la media y los percentiles del 16% y del 84%), Espectro de peligrosidad uniforme (UHS), ambos del proyecto RISMUR y Espectro de respuesta según la Norma NCSE-02.

## 2.4. INSTRUMENTACION DE LA ZONA

En el momento del terremoto premonitor de magnitud  $M_w$  4.5, y del principal  $M_w$  5.1, se encontraban en funcionamiento el 100% de las estaciones sísmicas digitales VSAT. Para el sismo principal, la alerta sísmica y por tanto el primer cálculo automático de parámetros focales, se realizó a partir de 10 estaciones de registro en velocidad, siendo siete de ellas pertenecientes a la red sísmica del IGN, una de IGN compartida con la Universidad de Alicante y dos pertenecientes al Instituto Andaluz de Geofísica (IAG). Esta primera determinación se realizó 1 minuto y 25 segundos a partir de la hora origen.

La determinación de parámetros focales revisada, del sismo principal, se obtuvo a partir de 58 estaciones sísmicas pertenecientes a diferentes agencias, tal como se indica en la Tabla 2.5. La distancia desde el epicentro hasta la estación sísmica de registro en velocidad más próxima fue de 37 km, siendo ésta la estación sísmica de La Murta (Murcia).

En cuanto a la red de acelerógrafos, en el momento de la ocurrencia del sismo principal se encontraban en funcionamiento 110 instrumentos de los 114 instalados del IGN. El sismo principal fue registrado en aceleración por 17 acelerógrafos del IGN y por uno de la Confederación Hidrográfica del Segura, estando el más próximo, Lorca, a 3 km del epicentro y el más lejano, Jaén, a 186 km. Los acelerógrafos, de 22 bit de resolución, están programados con un máximo de rango dinámico de  $\pm 1g$  y un nivel umbral de disparo de 0,002g. Todos ellos disponen de señal de tiempo GPS.

**Tabla 2.5.** Estaciones usadas en el cálculo.

AGENCIA	Nº DE ESTACIONES
Instituto Geográfico Nacional (IGN)	44
Instituto Andaluz de Geofísica (IAG)	3
Midi-Pyrénées (Francia)	2
Instituto Meteorológico de Portugal (IM)	4
Institut Geològic de Catalunya (IGC)	2
IGN + Universidad de Alicante	1
Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG). Argelia	1
Observatorio del Ebro (CSIC)	1

A partir del día siguiente a la ocurrencia del sismo principal, se instaló en la ciudad de Lorca una unidad móvil de la RSN con una estación digital de banda ancha completa con transmisión VSAT, así como un sensor de banda media y un acelerómetro, también de envío de datos en tiempo real. En la figura 2.20. está representada esta estación móvil junto con el resto de estaciones y acelerógrafos de la Red Sísmica Nacional y de otras instituciones.



**Figura 2.20.** Estaciones sísmicas y acelerógrafos de la Red Sísmica Nacional y de otras instituciones, situadas en la región próxima al epicentro.

## 3. CARACTERÍSTICAS DEL TERREMOTO

### 3.1. LOCALIZACIÓN

La localización de los terremotos de toda la serie se ha calculado con las estaciones sísmicas disponibles, tanto del IGN como de otras instituciones (IAG, ROA, UCM, UA). Asimismo, dada la proximidad de los equipos de aceleración, sus tiempos de llegada también han sido utilizados en el cálculo, sobresaliendo el acelerógrafo de Lorca que situado muy próximo al epicentro ha permitido un cálculo del hipocentro con un margen de error muy pequeño. El modelo de corteza utilizado ha sido el utilizado en el sistema ARS y los resultados del cálculo de los parámetros de localización de los dos terremotos iniciales de la serie, el premonitorio y el principal, son los que figuran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Localización de los dos terremotos principales

Fecha	Hora (GMT)	Latitud	Longitud	Prof (km)
11-mayo-2011	15:05:13	37.7041	-1.6812	2
11-mayo-2011	16:47:25	37.6946	-1.6756	3

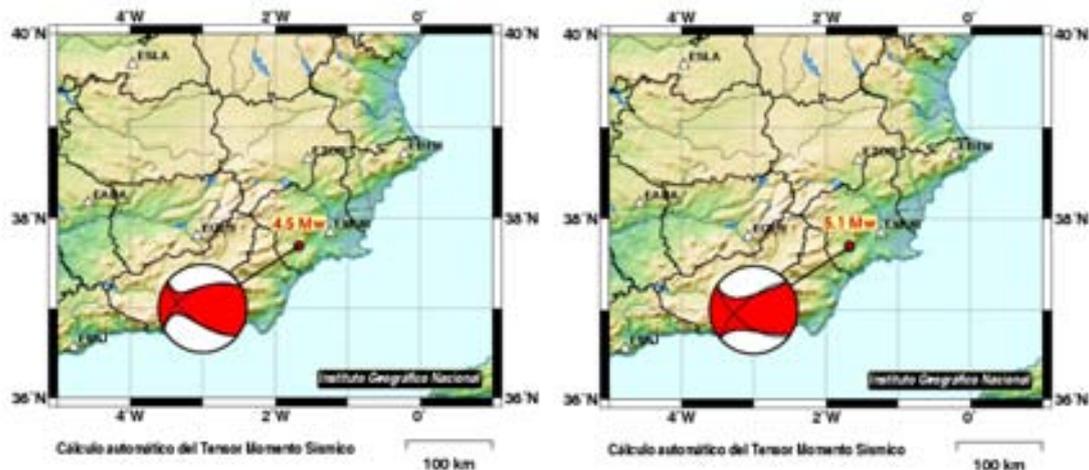
Los dos terremotos están muy próximos entre sí y están localizados aproximadamente a 2 km al noreste de la ciudad de Lorca. También las profundidades de los focos son similares, si bien este parámetro, al estar más condicionado a causa del modelo de estructura, presenta una mayor incertidumbre.

### 3.2. MECANISMO FOCAL Y MAGNITUD

Para los dos terremotos de mayor magnitud se ha podido determinar su tensor momento sísmico y por tanto su mecanismo focal, el momento sísmico escalar  $M_0$ , la

magnitud momento  $M_w$  y también la profundidad del foco dada por el centroide.

En la figura 3.1 se representa el mecanismo focal de ambos sismos, observándose una gran coincidencia entre ellos, con movimiento de desgarre y ligera componente inversa, coincidiendo con las características de esta parte de la falla de Alhama de Murcia.



**Figura 3.1.** Mecanismo focal de los dos terremotos principales. A la izquierda el premonitorio (11 mayo 2011, 15:05; 4.5  $M_w$ ) y a la derecha el principal (11 mayo 2011, 16:47; 5.1  $M_w$ ).

Respecto a los parámetros que definen el foco sísmico y su tamaño, la tabla 3.2 recoge estos datos, observándose como el momento sísmico escalar del principal tiene casi un orden de magnitud superior al premonitorio, lo que puede traducirse entre 4 y 5 veces más en términos de superficie de la fractura. Si consideramos la energía sísmica liberada por ambos, el principal generó 8 veces más energía que el premonitorio.

**Tabla 3.2.** Tamaño de los dos terremotos principales.

Fecha	Hora (GMT)	$M_0$ (N.m)	$M_w$	Prof (km)
11-mayo-2011	15:05:13	$6.47 \cdot 10^{22}$	4.5	2
11-mayo-2011	16:47:25	$4.89 \cdot 10^{23}$	5.1	2

### 3.3. INFORMACIÓN MACROSÍSMICA

El terremoto principal del día 11 de mayo de 2011 se localizó a unos tres kilómetros de la ciudad de Lorca -donde prácticamente todos los edificios han quedado marcados

por la sacudida- y se sintió incluso en Madrid, a más de 400 km. Fue precedido por un terremoto de Mw 4.5 también dañino, que debilitó y aumentó la vulnerabilidad de algunos edificios. Nueve personas murieron, la mayoría bajo parapetos y cornisas caídos desde las partes altas de los edificios. El último terremoto con una Intensidad similar en España se produjo también en Murcia, el 29 de enero de 2005 al noroeste de Aledo, pero por haberse producido en una zona mucho menos poblada, no tuvo las consecuencias sociales ni económicas que el de Lorca, ciudad con una población de aproximadamente 80.000 habitantes.

Las personas que lo vivieron lo describen como muy fuerte y corto, comparándolo con una explosión. Para muchos fue difícil estar de pie, especialmente dentro de los edificios, e incluso una persona en una 7ª planta cayó al suelo. Algunas personas refieren haber visto ondular el suelo. Los objetos cayeron en gran número en algunas tiendas y muchas personas indican que cayeron muchos objetos en sus viviendas.

Mientras que la mayoría de los edificios de la ciudad presentan daños ligeros o moderados, tan sólo un edificio de viviendas colapsó completamente. Era un edificio construido recientemente, aparentemente sometido a los efectos producidos por pilares cortos, planta baja diáfana, choque con edificios colindantes con forjados a distintas alturas y emplazamiento en pendiente y en esquina. (ver capítulo 6).

La Intensidad es un parámetro que representa de forma global cómo ha afectado un terremoto a una localidad, por lo que no sólo se evalúa a partir de los daños producidos, sino que también se tienen en cuenta los efectos en las personas y en los objetos, (ver Anexo 1). Para una correcta interpretación de la Intensidad EMS hay que tener presente que cada grado incluye tanto los efectos descritos en su definición como los de grados anteriores y que no se puede asignar el grado superior si no se verifican la mayoría de los efectos en él descritos. Igualmente hay que tener presente que la Intensidad es un parámetro estadístico, por lo que los daños y efectos que se evalúen han de ser representativos estadísticamente, no hechos puntuales aislados. Así, por ejemplo, el edificio que colapsó, teniendo en cuenta el gran número de edificios existentes en Lorca y sus alrededores, no tiene valor estadístico y no hace que se alcance el criterio de “algunos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 5” del grado VIII. En otro capítulo de este informe se trata detalladamente el aspecto de los daños producidos por el terremoto, por lo que únicamente se mencionará aquí que para evaluar la Intensidad sólo han de tenerse en cuenta los daños provocados directamente por el terremoto, así, los daños producidos por colisión entre edificios, que ha sido un tipo de daño frecuente en Lorca, han de descartarse, a pesar de su innegable trascendencia desde otros puntos de vista.

Para evaluar la Intensidad Macrosísmica de los terremotos ocurridos en Lorca el 11 de

mayo de 2011 se han empleado las siguientes fuentes de información:

. Cuestionarios macrosísmicos: en la página de internet del Instituto Geográfico Nacional existe un cuestionario macrosísmico en el que voluntariamente la población informa de si ha sentido un terremoto o no y de los efectos observados. Aunque al producirse el primer terremoto se colapsó esta página por la gran cantidad de accesos a ella, se han recibido 611 cuestionarios relativos a los tres terremotos sentidos el 11 de mayo de 2001. Lentamente, este número sigue aumentando casi a diario.

. Trabajo de campo: el mismo día de producirse el terremoto tres ingenieros del IGN fueron a la zona epicentral, con el objetivo de instalar una unidad móvil y evaluar la máxima Intensidad. Posteriormente se volvió a Lorca los días 24 y 25 de mayo para evaluar la Intensidad en las poblaciones próximas a la ciudad de Lorca.

. Relación de expedientes del Consorcio de Compesación de Seguros: el CCS contaba el día 19 de mayo con 15.432 expedientes por daños en viviendas, repartidos en 259 localidades. Esta cifra se había incrementado el día 7 de julio a 24.469 expedientes, correspondientes a 520 localidades, con un presupuesto total de 161.310.175'89 €

. Consultas telefónicas: en los casos en los que los cuestionarios recibidos no han sido suficientes para evaluar la intensidad en una población, se ha llamado por teléfono a ayuntamientos, policía, farmacias, bares o particulares para ampliar y complementar la información.

Como resultado de la recopilación, estudio y elaboración de toda esta información se han obtenido los valores que de se indican en las tablas y mapas siguientes.

#### RELACIÓN DE INTENSIDADES (EMS) EN LAS LOCALIDADES DONDE SE TIENE CONSTANCIA DE HABER SIDO SENTIDO EL TERREMOTO PRINCIPAL:

VII ALTRITAR, LORCA.MU

VII ANGELES (LOS)-APOLONIA,LORCA.MU

VII LORCA.MU

VII MOLINO DE LA SIERRA,LORCA.MU

VII SAN CRISTOBAL,LORCA.MU

VII VIRGEN DE LAS HUERTAS,LORCA.MU

VI-VII SANTA QUITERIA,LORCA.MU

VI-VII SUTULLENA,LORCA.MU

VI CAMPILLO,LORCA.MU

VI CARRACLACA,LORCA.MU

VI CHURRA,LORCA.MU

VI HOYA. LA,LORCA.MU

VI MARCHENA,LORCA.MU

VI PULGARA,LORCA.MU

VI RÍO (EL), LORCA.MU

VI SAN ANTONIO,LORCA.MU

VI TORRECILLA,LORCA.MU

VI VILLAESPESA,LORCA.MU

V ALEDO.MU

V ALHAMA DE MURCIA.MU

V ALMENDRICOS,LORCA.MU

V ALPORCHONES,LORCA.MU

V APICHE, LORCA.MU

V BULLAS.MU

V CAMPILLO Y SUERTES, CEHEGÍN.MU

V CAZALLA, LORCA.MU

V CEHEGÍN.MU

V CEMENTERIO. EL, LORCA.MU

V CHARCA. LA, TOTANA.MU

V FUENSANTA. LA, LORCA.MU

V MULA.MU

V ORILLA Y PIÑERO, LORCA.MU

V PACA. LA, LORCA.MU

V PUERTO LUMBRERAS.MU

V PURIAS, LORCA.MU

V TOTANA.MU

V VÉLEZ-RUBIO.AL

V ZARCILLA DE RAMOS, LORCA.MU

IV-V BENIAJÁN, MURCIA.MU

IV ÁGUILAS.MU

IV ALCANTARILLA.MU

IV ALCAYNA (LA), MOLINA DE SEGURA.MU

IV ALGEZARES, MURCIA.MU

IV ARCHENA.MU

IV BENIEL.MU

IV CAMPOS DEL RÍO.MU

IV CARTAGENA.MU

IV CIEZA.MU

IV CORVERA, MURCIA.MU

IV DOLORES. LOS, CARTAGENA.MU

IV ESCUCHA, LORCA.MU

IV ESPINARDO, MURCIA.MU

IV ESTACIÓN, PUERTO LUMBRERAS.MU

IV HUÉRCAL-OVERA.AL

IV LABRADORCICO. EL, ÁGUILAS.MU

IV MAZARRÓN, MAZARRÓN.MU

IV MOLINA DE SEGURA.MU

IV MORATA, LORCA.MU

IV MURCIA.MU

IV NONDUERMAS, MURCIA.MU

IV PLIEGO.MU

IV SAN ANDRÉS, MURCIA.MU

IV SAN ANTOLÍN, MURCIA.MU

IV SANGONERA LA VERDE O ERMITA NUEVA, MURCIA.MU

IV VERA.AL

IV VIENTOS. LOS, MOLINA DE SEGURA.MU

IV ZARANDONA, MURCIA.MU

IV ZARZADILLA DE TOTANA, LORCA.MU

III-IV ALJUCER, MURCIA.MU

III-IV ALQUERÍAS, MURCIA.MU

III-IV LLANO DE BRUJAS, MURCIA.MU

III-IV SAN ANTON, MURCIA.MU

III ALBACETE.AB

III ALMORADÍA

III BARRIO DEL CARMEN, MURCIA.MU

III BARRIO DEL PROGRESO, MURCIA.MU

III BENABLÓN, CARAVACA DE LA CRUZ.MU

III BIGASTRO.A

III BLANCA.MU

III CABEZO DE TORRES, MURCIA.MU

III CALLOSA DE SEGURA.A

III CAÑADA DE AGRA, HELLÍN.AB

III CARBONERAS.AL

III CHIRIVEL.AL

III CUEVAS DEL ALMANZORA.AL

III ESPARRAGAL, MURCIA.MU

III ESPERANZA. LA, UNIÓN. LA.MU

III FENAZAR, MOLINA DE SEGURA.MU

III FÉREZ.AB

III FORTUNA.MU

III GARRUCHA.AL

III GRANADA.GR

III GUADALUPE DE MACIASCOQUE, MURCIA.MU

III HELLÍN.AB

III HOYA. LA, HUÉRCAL-OVERA.AL

III HUERTOS. LOS, ORIHUELA.A

III MANGA DEL MAR MENOR. LA, CARTAGENA.MU

III MATA. LA, TORREVIEJA.A

III NAREJOS. LOS, ALCÁZARES. LOS.MU

III ÑORA (LA), MURCIA.MU

III OLULA DEL RÍO.AL

III ORIHUELA.A

III OTRO LA'O (EL), ARCHENA.MU

III PALMA. LA, CARTAGENA.MU

III PALMAR (EL) O LUGAR DE DON JUAN, MURCIA.MU

III PATIÑO, MURCIA.MU

III PAZ (LA), MURCIA.MU

III PEÑICAS. LAS, MURCIA.MU

III PINÓS. EL/ PINOSO.A

III POLIGONO INDUSTRIAL, OLULA DEL RÍO.AL

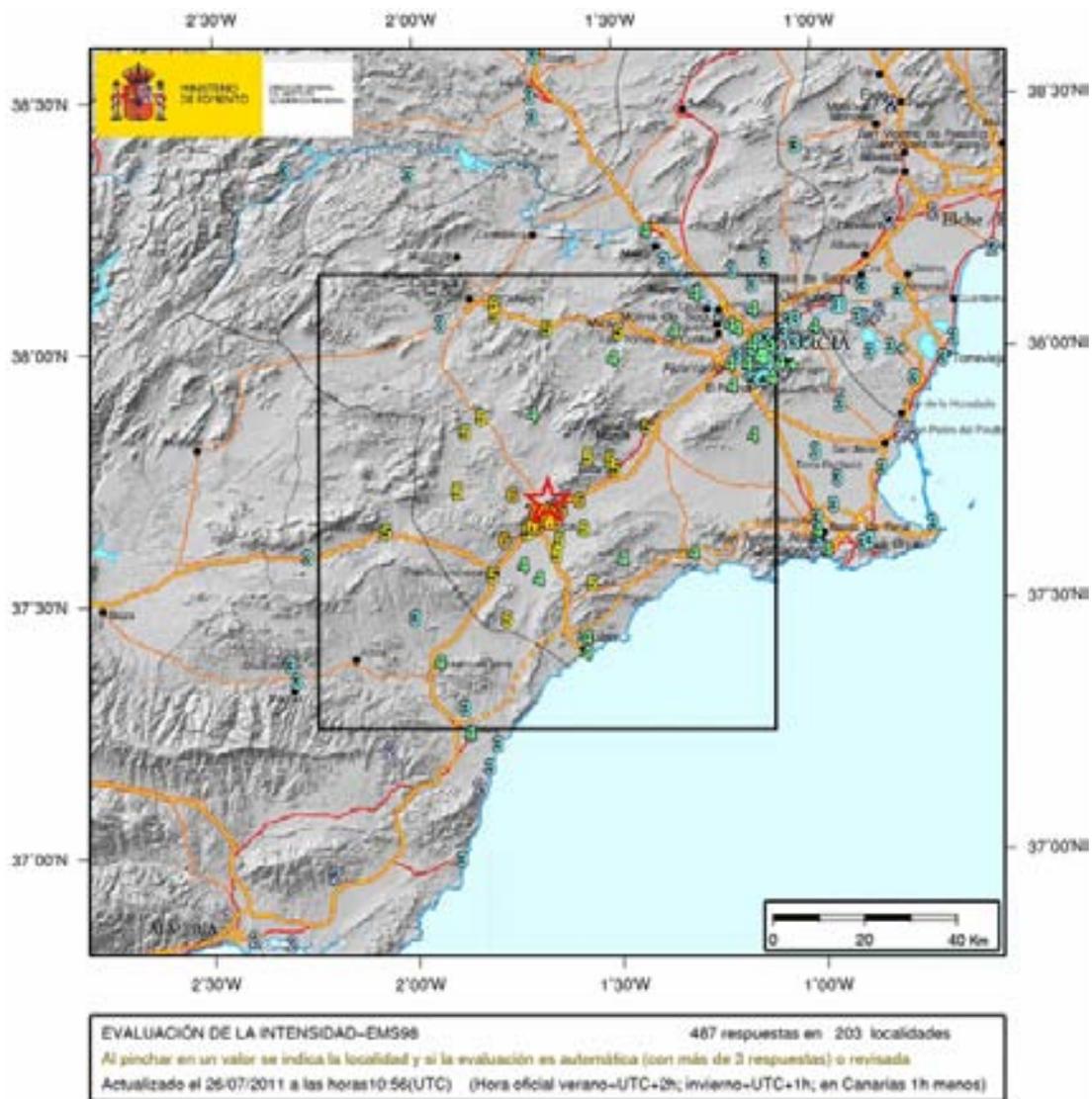
III PUNTAL. EL, MURCIA.MU

III ROLDÁN, TORRE-PACHECO.MU

III SANTA ANA, CARTAGENA.MU

III SANTIAGO Y ZARÁICHE, MURCIA.MU

III SANTO ÁNGEL,MURCIA.MU	II CARLET.V
III SANTOMERA.MU	II CASAS DE FERNANDO ALONSO.CU
III SUCINA,MURCIA.MU	II CAZORLA.J
III TOBARRA.AB	II CIUDAD REAL.CR
III TORREMENDO,ORIHUELA.A	II CÓRDOBA.CO
III TORRE-PACHECO.MU	II COSLADA.M
III TORREVIEJA.A	II CREVILLEN.T.A
III ÚBEDA.J	II ELCHE/ELX.A
III UNIÓN. LA,UNIÓN. LA.MU	II ELDA.A
III UNIÓN. LA.MU	II GANDIA.V
III URBANIZACION NUEVA CARTAGENA,CARTAGENA.MU	II GETAFE.M
III VALIENTES. LOS,MOLINA DE SEGURA.MU	II JAÉN.J
III VERA.AL	II JUNCAREJO (EL),VALDEMORO.M
III VERA-PLAYA,VERA.AL	II LEGANÉS.M
III VILLAMARTÍN,ORIHUELA.A	II LINARES.J
III VISTA ALEGRE,MURCIA.MU	II LUBRÍN.AL
III YECLA.MU	II MADRID.M
III YESTE.AB	II MÁLAGA.MA
II-III ALBERCA DE LAS TORRES,MURCIA.MU	II MARTOS.J
II-III BAEZA.J	II MOJÁCAR.AL
II-III BARRIO DE LA CONCEPCION,CARTAGENA.MU	II NAVALCARNERO.M
II-III CUARTEROS. LOS,SAN PEDRO DEL PINATAR.MU	II NAVALMORAL DE LA MATA.CC
II-III GARRES. LOS,MURCIA.MU	II NÚJAR.AL
II-III INFANTE JUAN MANUEL,MURCIA.MU	II ONTINYENT.V
II-III JACARILLA.A	II PARLA.M
II ABANILLA.MU	II PARQUE COIMBRA,MÓSTOLES.M
II ALBAIDA.V	II RESIDENCIAL ONTIGOLA,ONTÍGOLA.TO
II ALCALÁ DE HENARES.M	II RETAMAR,ALMERÍA.AL
II ALCALÁ LA REAL.J	II SAN FERNANDO DE HENARES.M
II ALCORCÓN.M	II SAN PEDRO DEL PINATAR.MU
II ALCOY/ALCOI.A	II SANATORIO DE ALCOHETE,YEBES.GU
II ALICANTE/ALACANT.A	II SANT JOAN D' ALACANT.A
II ALMANSA.AB	II SANTA POLA.A
II ALZIRA.V	II SIERRA (LA) O BUENAVISTA,MONTILLA.CO
II ARENAL,JÁVEA/XÀBIA.A	II SUECA.V
II ARGANDA DEL REY.M	II TORREDONJIMENO.J
II AZUQUECA DE HENARES.GU	II TORREJÓN DE ARDOZ.M
II BAILÉN.J	II VALDEMORO.M
II BARRIO DE LA CONCEPCION,CARTAGENA.MU	II VALENCIA.V
II BENEJÚZAR.A	II VÉLEZ-MÁLAGA.MA
II CAMPELLO. EL.A	II VILLACARRILLO.J
II CANALS.V	II VILLARROBLEDO.AB
II CAÑADA DE SAN URBANO. LA,ALMERÍA.AL	II VILLENA.A



**Figura 3.2.** Distribución de la Intensidad macrosísmica para las localidades que percibieron el terremoto principal.

### 3.4. CARACTERÍSTICAS DE LA SERIE SÍSMICA

En la hora y 45 minutos que transcurrieron entre el terremoto premonitorio de magnitud 4.5 y el principal de 5.1 ocurrieron 6 sismos entre las magnitudes de 1.5 y 2.6. Después del principal se han producido 135 réplicas contabilizadas hasta el día 14 de julio, de las cuales fueron sentidas 16, alcanzando solo una de ellas el grado IV (EMS-98) (tabla 3.3.). El número de terremotos desde el inicio, figura 3.3, fue disminuyendo con excepción de los ocurridos tres días después del principal, día en que hubo un pico notable similar al del primer día, lo que fue debido a un terremoto de magnitud 2.9 con una importante sucesión de réplicas en las siguientes tres horas. Asimismo se observa cómo a partir del quinto día se suceden grandes espacios temporales en los que no se registra ninguna réplica.

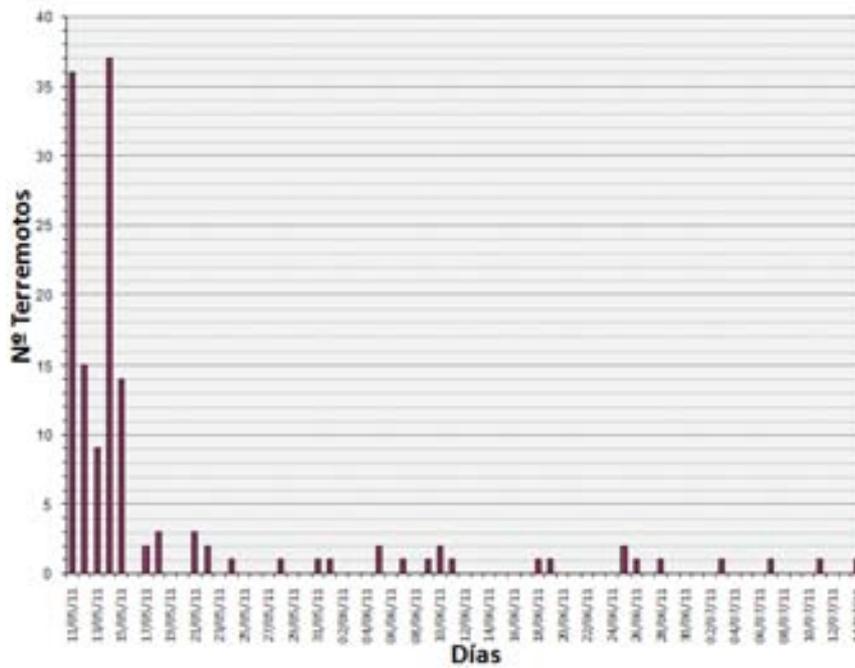


Figura 3.3. Distribución temporal de la serie sísmica.

Respecto a la evolución de la magnitud a lo largo de la serie podemos apreciar en la figura 3.4. una concentración con todos los valores registrados en los primeros cinco días, con una lógica disminución de las magnitudes máximas diarias durante la primera semana, manteniéndose posteriormente en un intervalo de un grado entre las magnitudes 1 y 2.

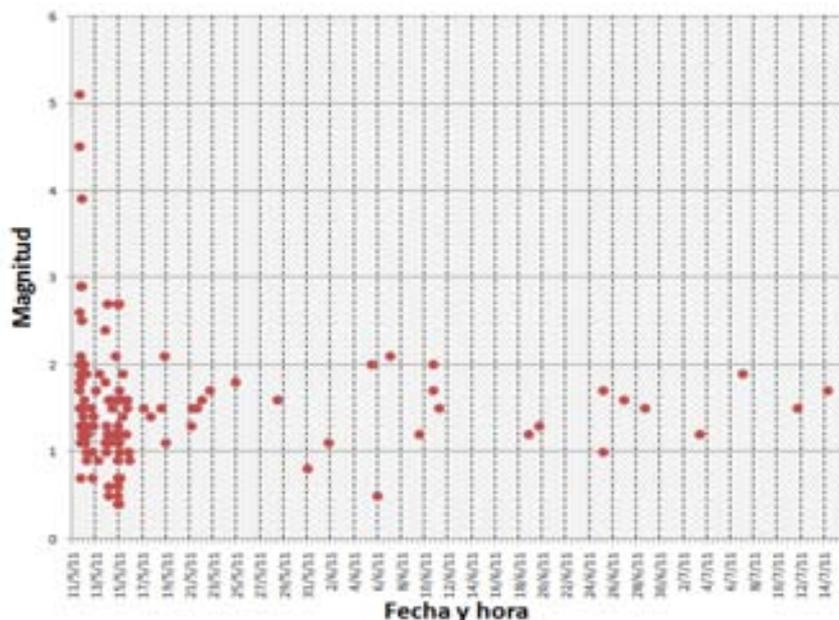
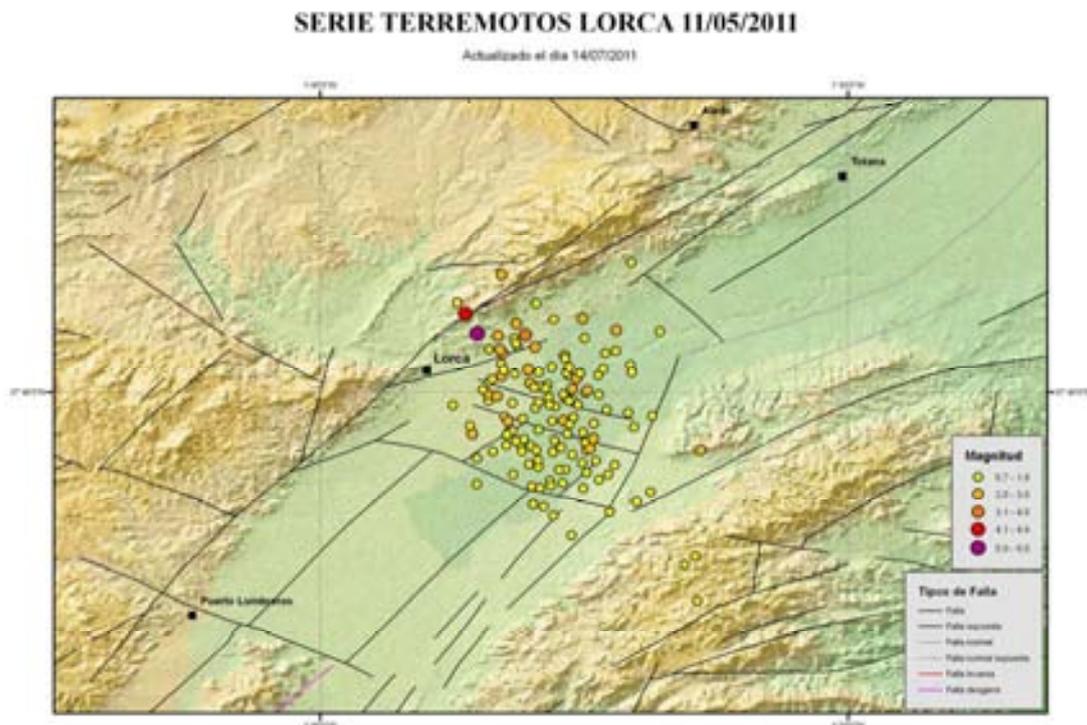


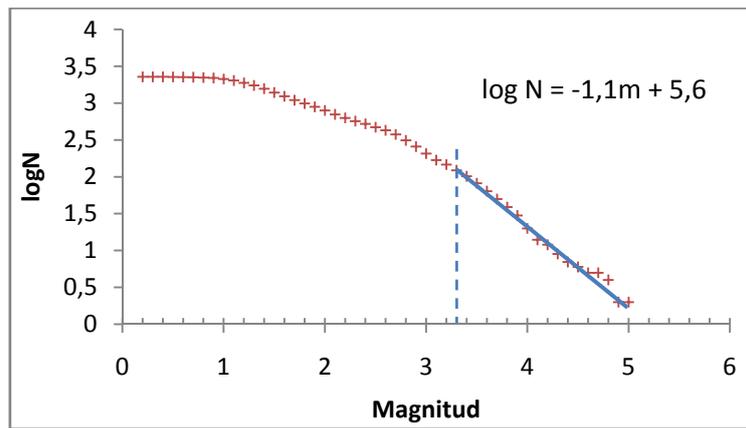
Figura 3.4. Evolución temporal de la magnitud de la serie sísmica.

La distribución espacial de la serie está representada en el mapa de la figura 3.5, donde se puede apreciar que todos los terremotos están localizados en el cuadrante SE respecto al principal. Con objeto de asegurar la calidad en la localización se han realizado de forma independiente cálculos epicentrales a partir de diferencias de tiempo de llegada, resultando una distribución espacial muy similar.



**Figura 3.5.** Distribución espacial del terremoto principal y la serie sísmica.

Si asumimos que la distribución de la magnitud-frecuencia de la falla de Alhama de Murcia y su sistema de fracturas asociadas es similar a la de la zona de estudio que hemos considerado, es posible comparar entre ambas el parámetro  $b$  de la relación de Gutenberg-Richter. La figura 3.6. muestra la distribución magnitud-frecuencia para la zona de estudio, obteniéndose el parámetro  $b=1.1$  considerando una completitud a partir de la magnitud 3.3 para el periodo 1930-2010. Comparado con el valor  $b=1.0$  determinado para la serie de réplicas, se observa esta pequeña diferencia que puede ser debida a diferentes factores. Uno de ellos podría ser la existencia de gaps entre los valores de las magnitudes de la serie de réplicas, lo que hace que el ajuste de la recta de regresión tenga una desviación mayor. También la propia asunción de la similitud de los niveles de actividad podría ser la causa de la diferencia.



**Figura 3.6.** Distribución de la relación de magnitud-frecuencia (Gutenberg-Richter) de la región de estudio (periodo 1930-2010).

**Tabla 3.3.** Relación de terremotos de la serie de Lorca 2011

Fecha	Hora (GMT)	Latitud	Longitud	h (km)	Int	Mag	Localización
14/07/2011	07:13:56	37.6461	-1.6615	7		1.7	SE LORCA.MU
11/07/2011	17:37:26	37.6728	-1.6685			1.5	E LORCA.MU
07/07/2011	02:19:13	37.6318	-1.6104		II	1.9	SE LORCA.MU
03/07/2011	10:23:20	37.6217	-1.6406	4		1.2	SE LORCA.MU
28/06/2011	18:52:15	37.6293	-1.6368		II	1.5	SE LORCA.MU
26/06/2011	23:33:59	37.6955	-1.5891	4		1.6	E LORCA.MU
25/06/2011	05:28:06	37.6511	-1.6319	4		1.7	SE LORCA.MU
25/06/2011	04:52:34	37.6384	-1.6681	5		1.0	SE LORCA.MU
19/06/2011	19:23:40	37.6130	-1.6491	5		1.3	SE LORCA.MU
18/06/2011	20:28:17	37.6514	-1.6204			1.2	SE LORCA.MU
11/06/2011	06:06:18	37.6754	-1.6579			1.5	E LORCA.MU
10/06/2011	17:01:17	37.6396	-1.6222	3	II	2.0	SE LORCA.MU
10/06/2011	17:00:51	37.6386	-1.6240			1.7	SE LORCA.MU
09/06/2011	13:40:40	37.6786	-1.6403			1.2	E LORCA.MU
07/06/2011	02:03:15	37.6674	-1.6235	3	III	2.1	E LORCA.MU
05/06/2011	23:35:38	37.6031	-1.6238			0.5	SE LORCA.MU
05/06/2011	12:08:29	37.6528	-1.6348	4	III	2.3	SE LORCA.MU
01/06/2011	20:37:53	37.6758	-1.6270			1.1	E LORCA.MU
31/05/2011	02:14:19	37.6602	-1.6870	4		0.8	SE LORCA.MU
28/05/2011	10:30:49	37.6425	-1.6244		II	1.6	SE LORCA.MU
24/05/2011	23:10:56	37.7089	-1.6475		II	1.8	NE LORCA.MU
22/05/2011	18:03:36	37.6342	-1.6467			1.1	SE LORCA.MU
22/05/2011	02:02:49	37.7282	-1.6027			1.6	S ALEDO.MU
21/05/2011	16:29:18	37.6471	-1.6255			1.6	SE LORCA.MU
21/05/2011	07:03:53	37.6770	-1.6631	2		1.5	E LORCA.MU
21/05/2011	04:12:33	37.6295	-1.6339			1.3	SE LORCA.MU
18/05/2011	23:39:03	37.6281	-1.6239			1.1	SE LORCA.MU
18/05/2011	20:31:11	37.6867	-1.6648	5	III	2.0	E LORCA.MU
18/05/2011	14:24:50	37.7093	-1.6851			1.6	NE LORCA.MU
17/05/2011	17:28:13	37.5979	-1.6310	7		1.4	SE LORCA.MU
17/05/2011	02:41:04	37.6617	-1.6464	10		1.5	SE LORCA.MU
15/05/2011	22:36:33	37.6272	-1.6135			0.9	SE LORCA.MU
15/05/2011	19:23:18	37.6762	-1.6024			1.0	E LORCA.MU
15/05/2011	18:52:08	37.6074	-1.6395			1.0	SE LORCA.MU

Fecha	Hora (GMT)	Latitud	Longitud	h (km)	Int	Mag	Localización
15/05/2011	17:33:01	37.6825	-1.6339	5		1.6	E LORCA.MU
15/05/2011	16:29:07	37.6862	-1.6100	2		1.5	E LORCA.MU
15/05/2011	15:50:12	37.6778	-1.6159	2		1.2	E LORCA.MU
15/05/2011	08:33:26	37.6590	-1.6479	4		1.4	SE LORCA.MU
15/05/2011	06:54:40	37.6761	-1.6464			1.9	E LORCA.MU
15/05/2011	05:21:54	37.6622	-1.6321	6		1.6	E LORCA.MU
15/05/2011	02:35:33	37.6213	-1.6498			0.7	SE LORCA.MU
15/05/2011	01:24:58	37.6350	-1.6758			1.0	SE LORCA.MU
15/05/2011	01:11:54	37.6388	-1.6475			1.2	SE LORCA.MU
15/05/2011	00:50:13	37.6438	-1.6674			0.4	SE LORCA.MU
15/05/2011	00:03:03	37.6646	-1.6663	7	III	2.8	SE LORCA.MU
14/05/2011	23:52:41	37.6898	-1.6573			1.2	E LORCA.MU
14/05/2011	23:27:51	37.6605	-1.6279	4		1.2	E LORCA.MU
14/05/2011	23:23:20	37.6605	-1.6414			1.2	SE LORCA.MU
14/05/2011	23:19:17	37.6434	-1.6390	3		1.8	SE LORCA.MU
14/05/2011	22:54:29	37.6800	-1.6642			1.2	E LORCA.MU
14/05/2011	22:45:59	37.6372	-1.6550			0.4	SE LORCA.MU
14/05/2011	22:43:06	37.6683	-1.6432	3		1.4	E LORCA.MU
14/05/2011	22:30:51	37.6288	-1.6573			0.5	SE LORCA.MU
14/05/2011	22:23:39	37.6428	-1.6487			0.4	SE LORCA.MU
14/05/2011	22:04:13	37.6384	-1.6544			0.9	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:58:51	37.6503	-1.6790			0.7	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:57:37	37.6641	-1.6417			1.3	E LORCA.MU
14/05/2011	21:54:35	37.6743	-1.6641	4	III	2.7	E LORCA.MU
14/05/2011	21:49:20	37.6479	-1.6589			1.1	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:45:40	37.6025	-1.6449			0.6	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:42:12	37.6321	-1.6511	2		1.0	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:35:59	37.6240	-1.6412			0.8	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:34:51	37.6715	-1.6698			1.1	E LORCA.MU
14/05/2011	21:33:34	37.6409	-1.6501			0.9	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:31:47	37.6206	-1.6460			1.1	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:30:49	37.6689	-1.6486			1.5	E LORCA.MU
14/05/2011	21:29:08	37.6678	-1.6729			1.5	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:25:24	37.6299	-1.6517			0.6	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:22:36	37.6870	-1.6698			1.1	NE LORCA.MU
14/05/2011	21:13:45	37.6412	-1.6619	4		1.7	SE LORCA.MU
14/05/2011	21:10:25	37.6656	-1.6703	5	III	2.9	SE LORCA.MU
14/05/2011	17:32:52	37.6525	-1.6610	1	III	2.1	SE LORCA.MU
14/05/2011	10:59:57	37.6433	-1.6570			1.4	SE LORCA.MU
14/05/2011	10:56:47	37.6624	-1.6702	2		1.8	SE LORCA.MU
14/05/2011	09:36:59	37.6566	-1.6040			1.8	E LORCA.MU
14/05/2011	08:24:41	37.6528	-1.6400			1.6	SE LORCA.MU
14/05/2011	04:28:05	37.6401	-1.6359			1.2	SE LORCA.MU
14/05/2011	03:31:29	37.6785	-1.6321	3		1.7	E LORCA.MU
14/05/2011	02:26:53	37.6229	-1.6349			0.7	SE LORCA.MU
14/05/2011	02:11:14	37.6308	-1.6466			0.9	SE LORCA.MU
14/05/2011	00:52:27	37.6536	-1.6539	1		1.3	SE LORCA.MU
14/05/2011	00:49:32	37.6935	-1.6657	4	III	2.8	NE LORCA.MU
13/05/2011	23:22:26	37.6439	-1.6534	2		1.6	SE LORCA.MU
13/05/2011	22:36:30	37.6465	-1.6329			1.0	SE LORCA.MU
13/05/2011	22:32:40	37.6119	-1.6441			1.0	SE LORCA.MU
13/05/2011	21:08:37	37.6852	-1.6634	6	III	2.6	E LORCA.MU
13/05/2011	21:08:23	37.6881	-1.6481			2.0	E LORCA.MU
13/05/2011	20:59:20	37.6326	-1.6258			1.2	SE LORCA.MU
13/05/2011	07:48:20	37.6613	-1.6590	3		1.9	SE LORCA.MU

Fecha	Hora (GMT)	Latitud	Longitud	h (km)	Int	Mag	Localización
13/05/2011	05:17:51	37.6366	-1.6306			1.1	SE LORCA.MU
13/05/2011	01:30:30	37.6417	-1.6553	3		1.6	SE LORCA.MU
12/05/2011	20:53:27	37.6225	-1.6757	6		1.2	SE LORCA.MU
12/05/2011	20:51:01	37.6548	-1.6626	5		1.8	SE LORCA.MU
12/05/2011	19:47:20	37.6380	-1.6398			1.3	SE LORCA.MU
12/05/2011	19:00:46	37.6655	-1.6348			1.0	E LORCA.MU
12/05/2011	18:21:25	37.6701	-1.6422			1.5	E LORCA.MU
12/05/2011	17:18:17	37.6246	-1.6179			0.7	SE LORCA.MU
12/05/2011	16:24:29	37.6271	-1.6586			1.5	NE LORCA.MU
12/05/2011	08:09:27	37.6921	-1.6580	9		1.5	NE LORCA.MU
12/05/2011	06:11:16	37.6551	-1.5927	11		1.2	E LORCA.MU
12/05/2011	05:53:50	37.6205	-1.6253			1.3	SE LORCA.MU
12/05/2011	05:31:03	37.6733	-1.6286	11		2.0	E LORCA.MU
12/05/2011	04:48:56	37.6748	-1.6184			1.0	E LORCA.MU
12/05/2011	04:27:06	37.6142	-1.6000	7		1.3	SE LORCA.MU
12/05/2011	04:08:34	37.6653	-1.6179			1.2	E LORCA.MU
12/05/2011	01:50:47	37.6388	-1.5698	17		2.0	SE LORCA.MU
12/05/2011	00:15:16	37.5838	-1.5774	12		1.6	SE LORCA.MU
11/05/2011	23:38:03	37.6187	-1.5934	18		1.6	SE LORCA.MU
11/05/2011	23:21:55	37.7017	-1.6257	11		2.1	NE LORCA.MU
11/05/2011	23:05:48	37.6924	-1.6247	11		1.9	E LORCA.MU
11/05/2011	22:52:50	37.6775	-1.6514	11		2.1	E LORCA.MU
11/05/2011	22:48:37	37.6581	-1.6143	9		1.4	E LORCA.MU
11/05/2011	22:16:46	37.6661	-1.6246	10	S	1.4	E LORCA.MU
11/05/2011	21:43:54	37.6337	-1.6194	6		1.7	SE LORCA.MU
11/05/2011	21:41:44	37.5665	-1.5714			1.1	SE LORCA.MU
11/05/2011	21:40:54	37.6760	-1.6333			1.3	E LORCA.MU
11/05/2011	21:38:29	37.7013	-1.6394			1.0	NE LORCA.MU
11/05/2011	21:31:07	37.6627	-1.6303			1.4	E LORCA.MU
11/05/2011	21:28:00	37.6484	-1.6464			1.6	SE LORCA.MU
11/05/2011	20:44:06	37.6960	-1.6098	11		2.7	E LORCA.MU
11/05/2011	20:41:04	37.6681	-1.6306			2.1	E LORCA.MU
11/05/2011	20:37:45	37.6938	-1.6527	4	IV	3.9	NE LORCA.MU
11/05/2011	19:28:18	37.7224	-1.6641	2		2.9	NE LORCA.MU
11/05/2011	19:06:22	37.6794	-1.6029			1.1	E LORCA.MU
11/05/2011	19:02:20	37.6496	-1.6013			1.1	SE LORCA.MU
11/05/2011	19:01:30	37.6692	-1.6461	7		1.9	SE LORCA.MU
11/05/2011	18:51:31	37.5878	-1.5724	11		1.1	SE LORCA.MU
11/05/2011	18:35:32	37.6744	-1.6323	10		1.7	E LORCA.MU
11/05/2011	18:25:12	37.6993	-1.6570	8		2.0	NE LORCA.MU
11/05/2011	18:16:47	37.6851	-1.6149			1.7	E LORCA.MU
11/05/2011	17:37:01	37.6759	-1.6333			1.1	E LORCA.MU
11/05/2011	17:34:28	37.6886	-1.6565	4		1.9	E LORCA.MU
11/05/2011	17:07:48	37.6840	-1.6343	11		2.2	E LORCA.MU
11/05/2011	17:03:14	37.6598	-1.6387	8		1.9	SE LORCA.MU
11/05/2011	16:53:15	37.6638	-1.6337	11		2.8	E LORCA.MU
11/05/2011	16:47:25	37.6946	-1.6756	3	VII	5.1	NE LORCA.MU
11/05/2011	15:50:31	37.6473	-1.6609	7		1.8	SE LORCA.MU
11/05/2011	15:34:17	37.6442	-1.6205	6		2.0	SE LORCA.MU
11/05/2011	15:23:10	37.6092	-1.6128			1.5	SE LORCA.MU
11/05/2011	15:21:01	37.6710	-1.6505	10		2.6	E LORCA.MU
11/05/2011	15:13:01	37.6545	-1.6301	11		1.7	SE LORCA.MU
11/05/2011	15:11:01	37.6466	-1.6780			2.0	SE LORCA.MU
11/05/2011	15:05:13	37.7041	-1.6812	2	VI	4.5	NE LORCA.MU

## 4. REGISTROS DE ACELERACIÓN

### 4.1. INTRODUCCIÓN

La serie sísmica ocurrida en Lorca (Murcia) desde el día 11 de mayo de 2011 ha permitido registrar numerosos acelerogramas en las distintas estaciones de la red acelerométrica del IGN. Hasta la fecha se contabilizan un total de 36 registros (de 3 componentes), correspondientes a 13 terremotos de la serie, incluidos el terremoto principal, el premonitor y las réplicas más destacadas.

El primer terremoto (11/05/2011 15:05:13 UTC;  $M_w=4.5$ ) fue registrado por 5 estaciones de aceleración, a distancias entre aproximadamente 3 y 40 km de su epicentro. El terremoto principal (11/05/2011 16:47:25 UTC;  $M_w=5.1$ ) fue registrado por 17 estaciones situadas a distancias entre 3 y 185 km. La réplica de mayor tamaño (11/05/2011 20:37:45 UTC;  $M_w=3.9$ ) fue registrada por 4 estaciones a distancias entre 4 y 40 km. El resto de réplicas con registro de aceleración, todas de magnitudes menores que 3.0, sólo fueron registradas en la estación de Lorca.

### 4.2. ACELERACIONES DEL SUELO REGISTRADAS

En la tabla 4.1. se muestran los datos procesados de aceleración y velocidad pico (PGA –peak ground acceleration y PGV-peak ground velocity), para cada dirección o componente del movimiento, en las estaciones que registraron los tres terremotos del día 11 de mayo, antes citados. La tabla está ordenada por distancias epicentrales de las estaciones.

Los valores máximos de PGA registrados en Lorca, en los dos primeros terremotos (270 y 358  $\text{cm/s}^2$  respectivamente), son los más grandes, jamás antes registrados (instrumentalmente), en la península Ibérica, según consta en las bases de datos del IGN. Estos altos valores de aceleración pico son, principalmente, consecuencia de la proximidad del terremoto, cuyo epicentro se sitúa a unos 3 km y de la somera profundidad del foco. Después esos valores decaen con la distancia de acuerdo a lo

predicho, en general, por los modelos de atenuación del movimiento (ver apartado 4.3 s).

**Tabla 4.1.** Valores pico de aceleración y velocidad (PGA y PGV), registrados en los terremotos más importantes, ocurridos el día 11 de mayo de 2011.

		COMP. EW	COMP. NS	COMP. VERT.			
<b>11/05/2011 15:05:13 Mw=4.5 I=VI</b>							
ESTACIÓN	Dist. Epic.(km)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)
LORCA	4	125.6	4.1	269.5	12.9	74.1	2.3
ZARCILLA DE RAMOS	23	10.2	0.5	6.4	0.3	8.2	0.2
ALHAMA DE MURCIA-02	27	11.8	0.3	10.3	0.2	7.3	0.1
VELEZ-RUBIO	35	2.5	0.1	3.2	0.1	2.0	0.1
MULA	41	7.9	0.2	6.4	0.3	5.6	0.2
<b>11/05/2011 16:47:25 Mw=5.1 I=VII</b>							
ESTACIÓN	Dist. Epic.(km)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)
LORCA	3	150.3	14.2	357.9	35.6	114.9	8.0
ZARCILLA DE RAMOS	24	31.4	2.1	25.4	2.2	25.8	1.3
ALHAMA DE MURCIA-02	27	44.3	2.1	41.1	1.3	23.5	0.8
ALHAMA DE MURCIA-01	28	7.7	0.2	9.8	0.4	9.1	0.4
VELEZ-RUBIO	36	9.3	0.6	10.6	0.5	5.9	0.4
MULA	42	41.5	1.4	35.7	1.5	20.2	0.9
VERA	53	7.1	0.4	5.8	0.4	4.5	0.3
LORQUÍ	57	7.8	0.3	7.9	0.3	3.7	0.2
MURCIA	58	8.4	0.4	7.0	0.4	2.6	0.1
CIEZA	64	2.8	0.2	2.4	0.1	1.4	0.1
OLULA DEL RÍO	67	4.4	0.3	2.2	0.3	1.7	0.2
FORTUNA	73	7.5	0.3	6.4	0.3	3.5	0.2
JUMILLA	92	5.1	0.4	3.8	0.3	3.5	0.3
GUARDAMAR DEL SEGURA	100	1.4	0.1	2.0	0.2	0.6	0.1
ELDA	116	2.7	0.2	1.7	0.2	0.9	0.1
ALBOLOTE	182	1.4	0.2	2.3	0.2	0.8	0.1
JAEN	186	2.8	0.2	2.1	0.2	1.3	0.1
<b>11/05/2011 20:37:45 Mw=3.9 I=IV</b>							
ESTACIÓN	Dist. Epic.(km)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	PGV(cm/s)
LORCA	5	26.0	0.8	63.6	1.8	19.7	0.6
ALHAMA DE MURCIA-02	25	5.9	0.2	5.7	0.1	3.3	0.1
ZARCILLA DE RAMOS	26	4.3	0.2	3.5	0.1	4.0	0.1
MULA	41	5.9	0.2	5.0	0.2	2.6	0.1

En la figura 4.1. se muestran, sobre un mapa regional simplificado, la situación de las estaciones acelerométricas del IGN y los valores máximos de PGA horizontal registrados en cada una de éstas durante el terremoto principal. No están incluidas en dicha figura las estaciones de Jaén y Albolote situadas a más de 180 km y que también registraron el evento principal, con aceleraciones pico pequeñas, del orden de 2 cm/s<sup>2</sup>.



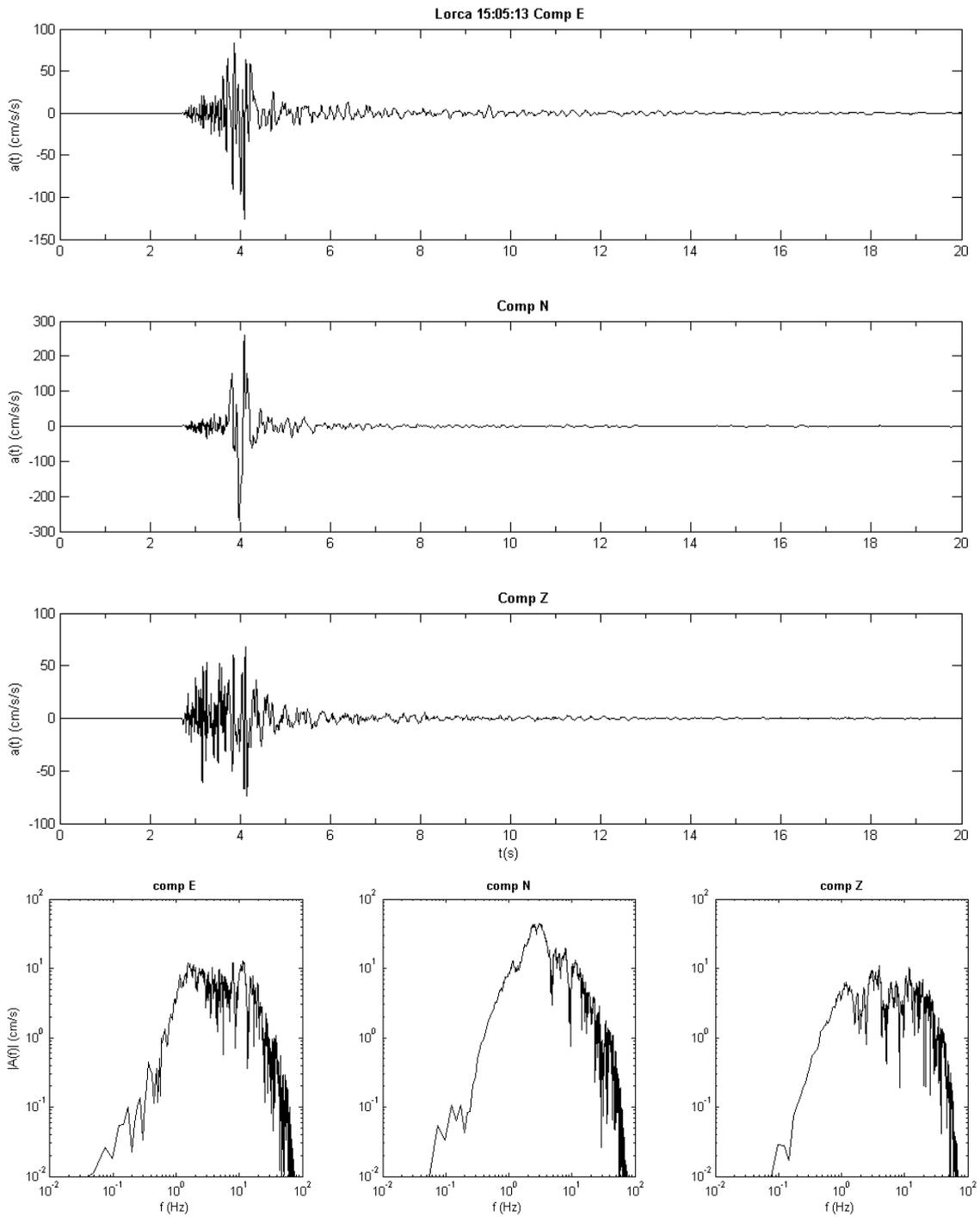
base de cada componente, y finalmente ha sido filtrado también en la misma banda (0.1-50 Hz).

En las figuras 4.2., 4.3. y 4.4. se muestran los acelerogramas y los espectros de amplitudes de Fourier de las 3 componentes de movimiento registradas en la estación de Lorca, en los tres terremotos del día 11. Estos acelerogramas se muestran en una escala común de tiempo (no absoluto) y distinta escala de amplitud con el fin de mejorar la visibilidad de las señales. Estos gráficos ofrecen una caracterización más completa del movimiento, que la dada únicamente por los valores pico.

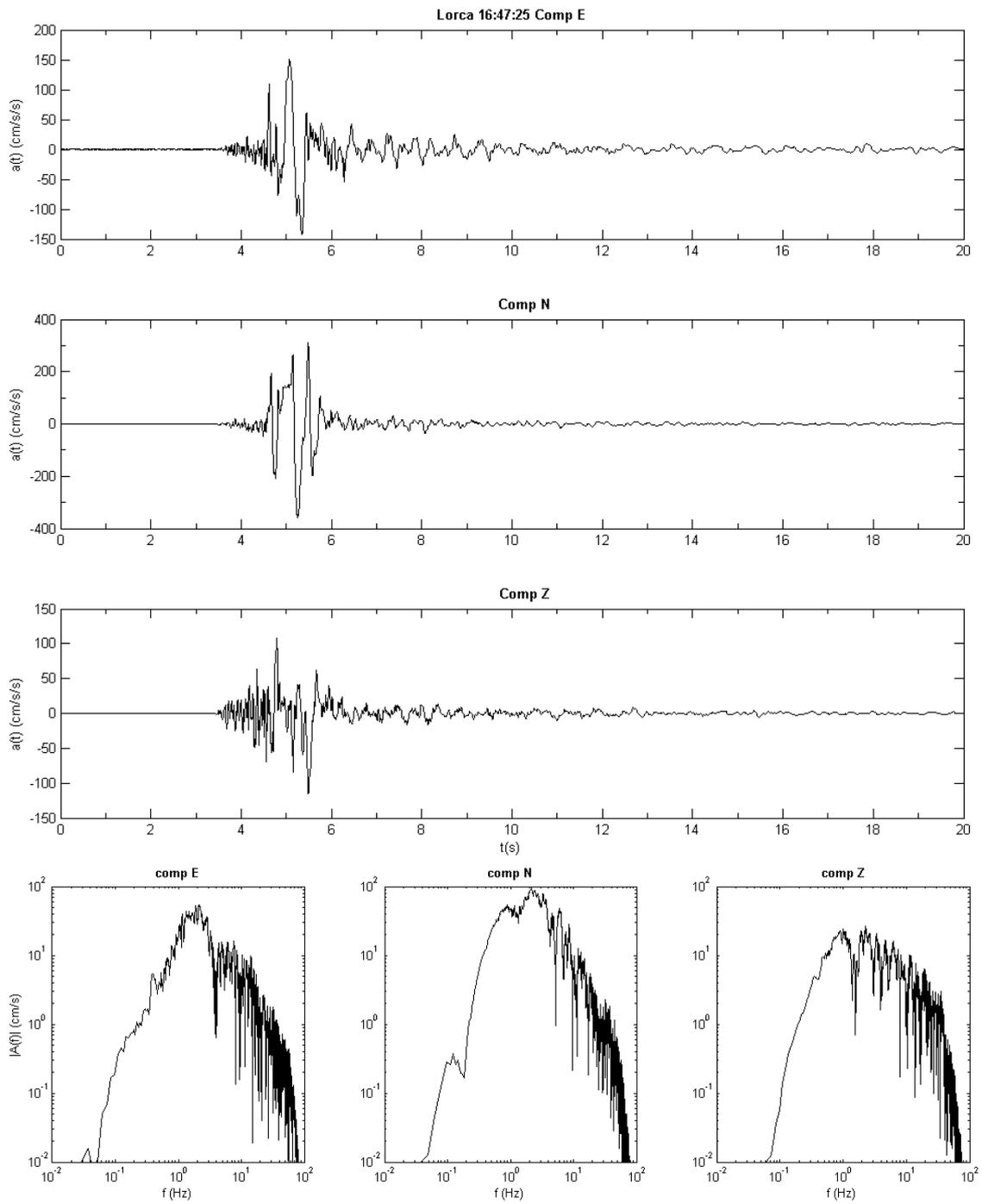
Como puede observarse, la componente denominada NS (en realidad N30W) es la que registra las amplitudes mayores en estos tres eventos. En particular en el terremoto principal, esta componente presenta una fase de movimiento fuerte muy acusada con una sucesión de picos por encima de 0.2 g en aproximadamente 2 s de duración.

En la figura 4.5. se muestran la aceleración, velocidad y desplazamiento obtenidos para esta componente. Puede observarse cómo la integración suaviza los picos de alta frecuencia, quedando el desplazamiento casi reducido a un único pulso de largo periodo correspondiente al paso por el emplazamiento, de la perturbación propagada desde la rotura. Este desplazamiento tiene una amplitud máxima del orden de 3 cm, (considerado dentro de la banda de frecuencias utilizada).

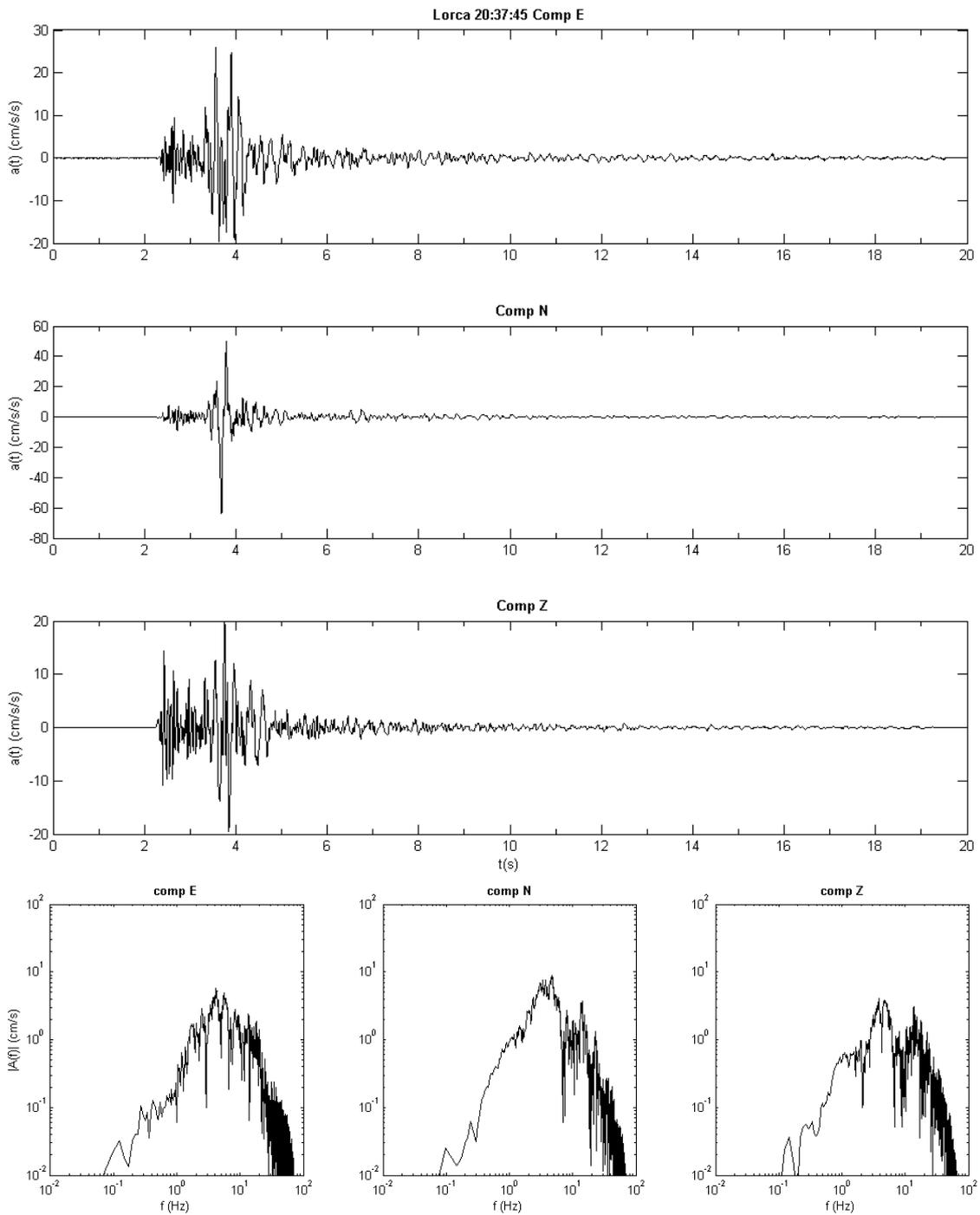
El análisis de los espectros de amplitudes indica que la máxima energía del movimiento está en la banda de frecuencias entre 0,5 y aproximadamente 8 Hz, con máximos de amplitudes en el rango entre 1 y 3 Hz. Estas amplitudes son notablemente mayores en el caso del terremoto principal que en los otros dos terremotos.



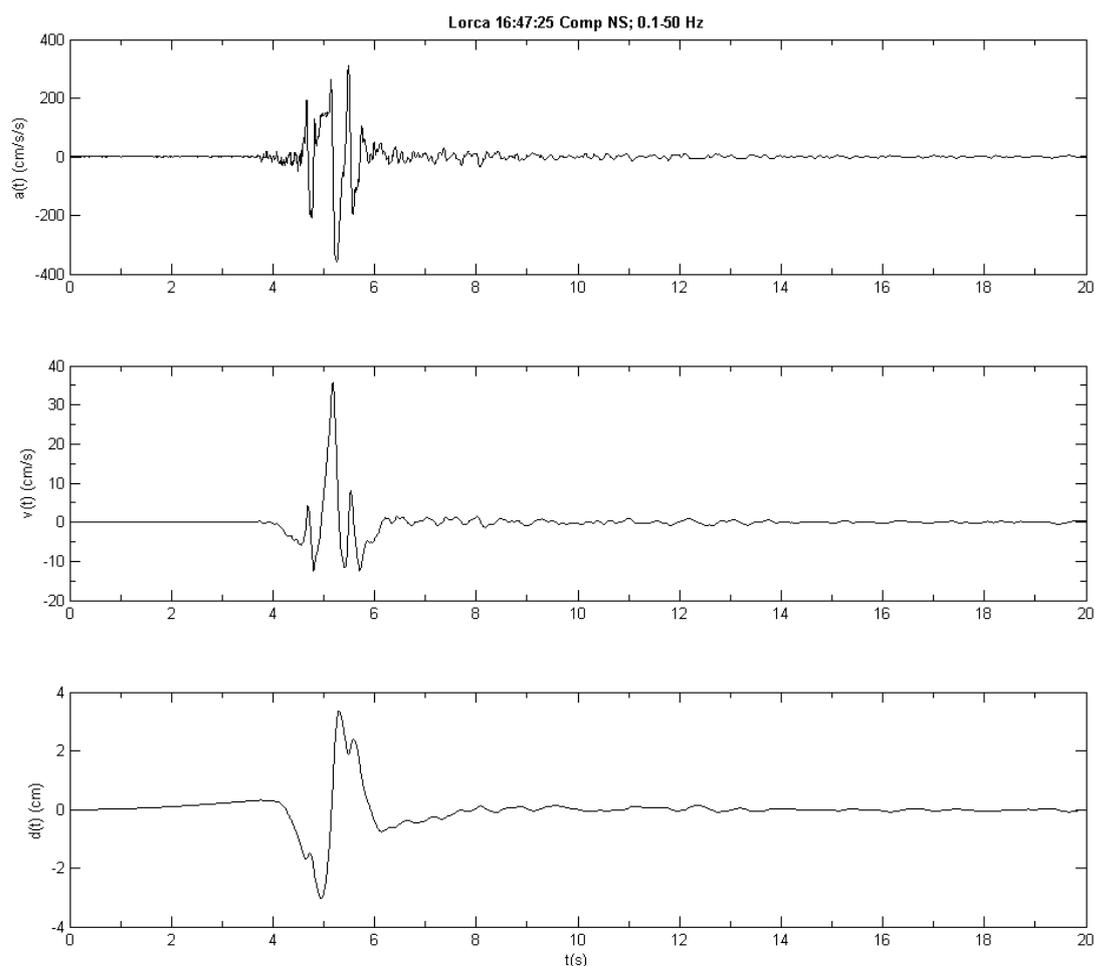
**Figura 4.2.** Terremoto 11/05/2011 15:05:13 (UTC),  $M_w=4.5$ . Acelerogramas y espectros de amplitud de Fourier registrados en Lorca.



**Figura 4.3.** Terremoto 11/05/2011 16:47:25 (UTC), Mw=5.1. Acelerogramas y espectros de amplitud de Fourier registrados en Lorca.



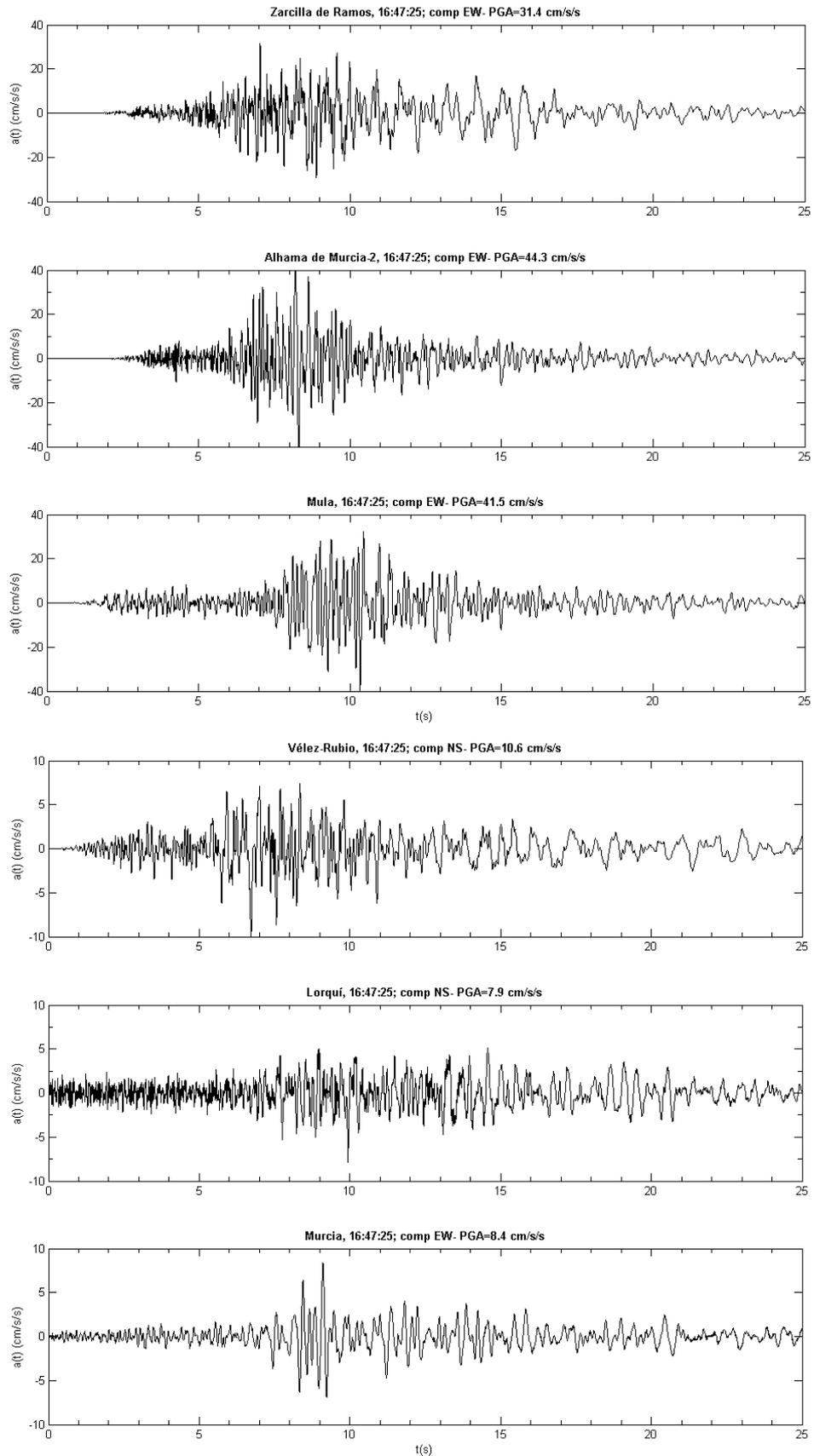
**Figura 4.4.-** Terremoto 11/05/2011 20:37:45 (UTC),  $M_w=3.9$ . Acelerogramas y espectros de amplitud de Fourier registrados en Lorca.



**Figura 4.5.** Terremoto 11/05/2011 16:47:25 (UTC),  $M_w=5.1$ . Lorca, componente NS (filtrado 0.1-50Hz). Aceleración velocidad y desplazamiento.

En el resto de estaciones que registraron estos terremotos el movimiento fuerte del suelo es de menor amplitud, debido principalmente a la atenuación del movimiento con la distancia. A continuación se muestran algunos de los registros del terremoto principal, obtenidos de las estaciones más destacadas, correspondientes a las componentes con PGA máxima, (figura 4.6.).

Otro factor importante a tener en cuenta en la amplitud registrada, es el efecto de las condiciones locales del suelo en el emplazamiento. Este parece ser el caso (aunque requiere un estudio más detallado) de los registros de las dos estaciones de Alhama de Murcia (ver tabla 4.1). Las estaciones, prácticamente a distancias similares del epicentro, están situadas en emplazamientos de características diferentes. El acelerómetro situado más próximo al centro de la cuenca del Guadalentín, es el que ha registrado una mayor amplitud del movimiento, posiblemente como consecuencia de la amplificación del terreno aluvial con mayor potencia, en el que se encuentra. En todo caso será necesaria una caracterización completa del suelo de estos emplazamientos.



**Figura 4.6.** Terremoto 11/05/2011 16:47:25 (UTC). Componentes con PGA máxima, obtenidas en diferentes estaciones.

### 4.3. ESPECTROS DE RESPUESTA

En el diseño de estructuras sismorresistentes, la acción sísmica viene caracterizada por un espectro de respuesta elástica en aceleración especificado en la normativa. De manera resumida, este espectro se basa en una forma espectral definida previamente, que es ajustada en función de la aceleración pico esperada, (obtenida del estudio de peligrosidad sísmica), y del tipo de suelo existente en el emplazamiento.

A continuación se muestran algunos de los espectros de respuesta en aceleración (con fracción de amortiguamiento crítico del 5%), obtenidos a partir de los registros de aceleración.

En la figura 4.7. se muestran los espectros de respuesta en aceleración obtenidos en Lorca para la componente NS (máxima PGA) en los tres terremotos del día 11. Junto a estos se han incluido los espectros de respuesta dados por la Norma NCSE-02 para dicha población.

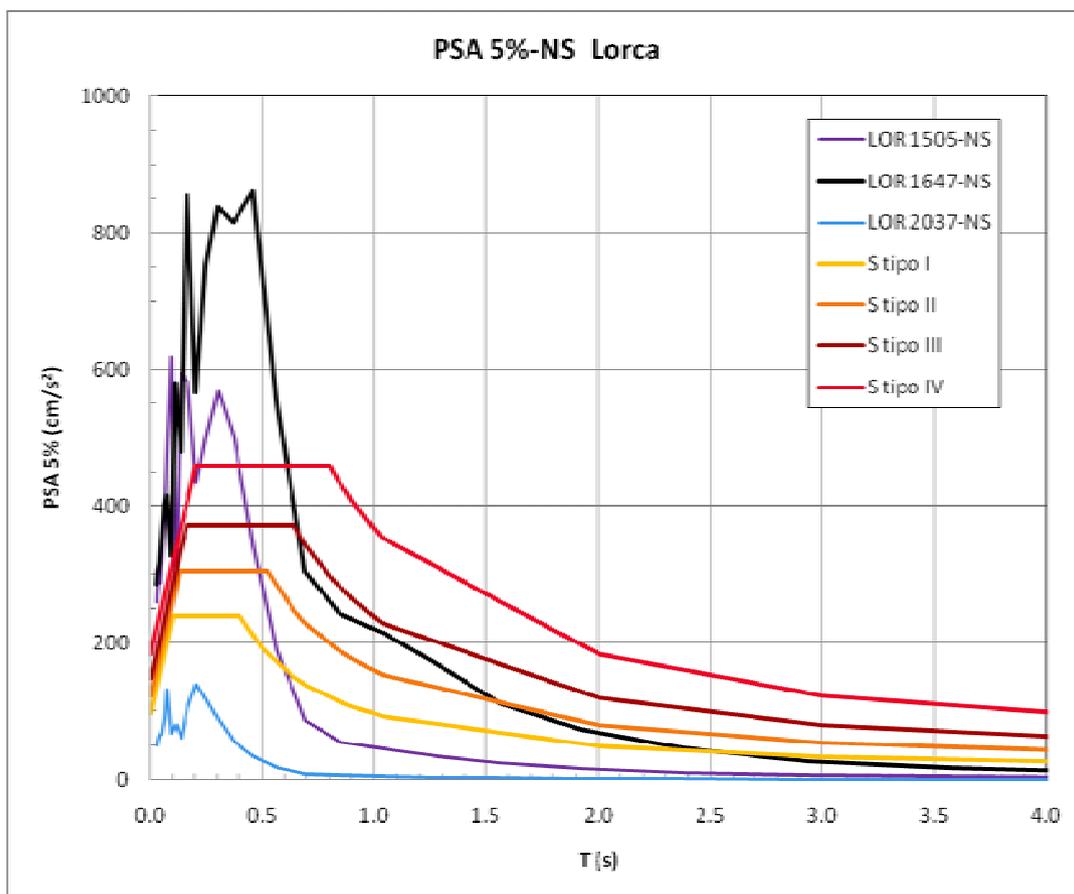


Figura 4.7. Espectros de respuesta PSA 5% y espectros propuestos NCSE-02 en Lorca.

En primer lugar, puede observarse que la respuesta a los tres terremotos tiene una diferencia de amplitud notable, de aproximadamente un factor 5 o mayor entre el registro del terremoto más pequeño y el principal. Los picos de respuesta se desplazan a periodos más largos a medida que el terremoto es más grande. En el caso del terremoto principal esta respuesta es máxima en la zona de periodos comprendida entre 0,16 y 0,46 s.

La comparación con los espectros de la NCSE-02, muestra que éstos han sido superados por los dos terremotos mayores, cualquiera que sea la clase de suelo que se considere. En particular, en el emplazamiento de la estación acelerométrica de Lorca, el espectro correspondería a un suelo de tipo II (suelo duro). Para ese caso vemos que el terremoto premonitor supera al espectro de diseño de la NCSE-02 en la zona de bajos periodos (desde aproximadamente  $T < 0.5s$ ). El terremoto principal supera dicha curva en un mayor rango, desde los periodos intermedios ( $T < 1.5 s$ )

En la figura 4.8., se muestran los espectros de respuesta de los emplazamientos que registraron los tres terremotos mayores, Alhama, Zarcilla y Mula, y también Vélez Rubio que sólo registró los dos primeros. En este caso puede observarse que las amplitudes de respuesta son menores y en general los máximos se sitúan en la zona de periodos más bajos, en torno a 0.2 s. Ninguno de estos espectros de respuesta ha superado a los espectros de diseño propuestos por la NCSE-02 en cada población.

#### **4.4. ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL SUELO**

Tal y como se ha visto el registro del terremoto principal en Lorca, alcanza aceleraciones muy superiores a las registradas en el resto de estaciones. Como ya se ha mencionado este registro está situado a una distancia epicentral aproximada de 3 km y previsiblemente, a una distancia  $R_{JB}$  nula (distancia Joyner and Boore-distancia más corta a la proyección del plano de rotura en superficie).

Por otra parte, como se muestra en la figura 4.9, donde se han representado algunos de los registros de aceleración, conjuntamente a la misma escala, se observa una atenuación alta hacia el NE (estaciones de Murcia y Fortuna), no siendo así hacia el oeste (estaciones de Zarcilla de Ramos y Mula).

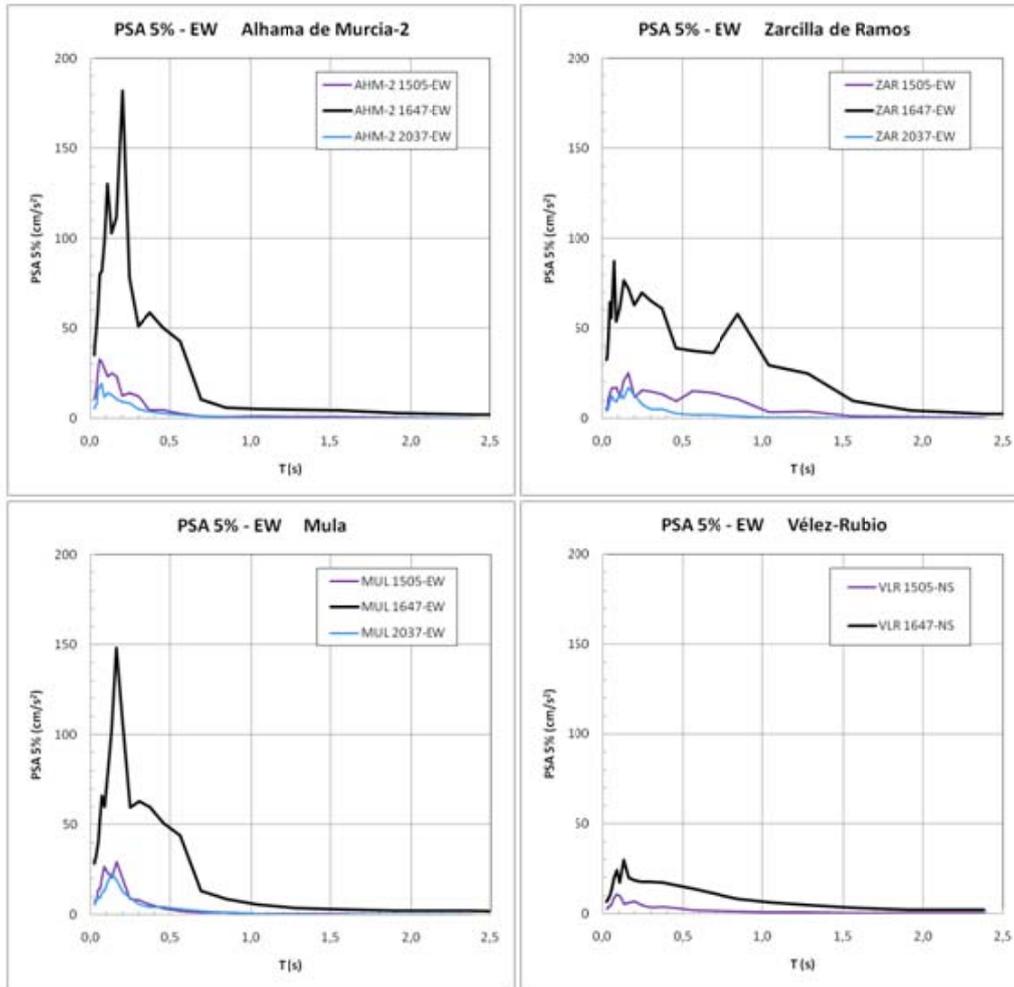


Figura 4.8. Espectros de respuesta PSA 5% obtenidos en distintos emplazamientos.

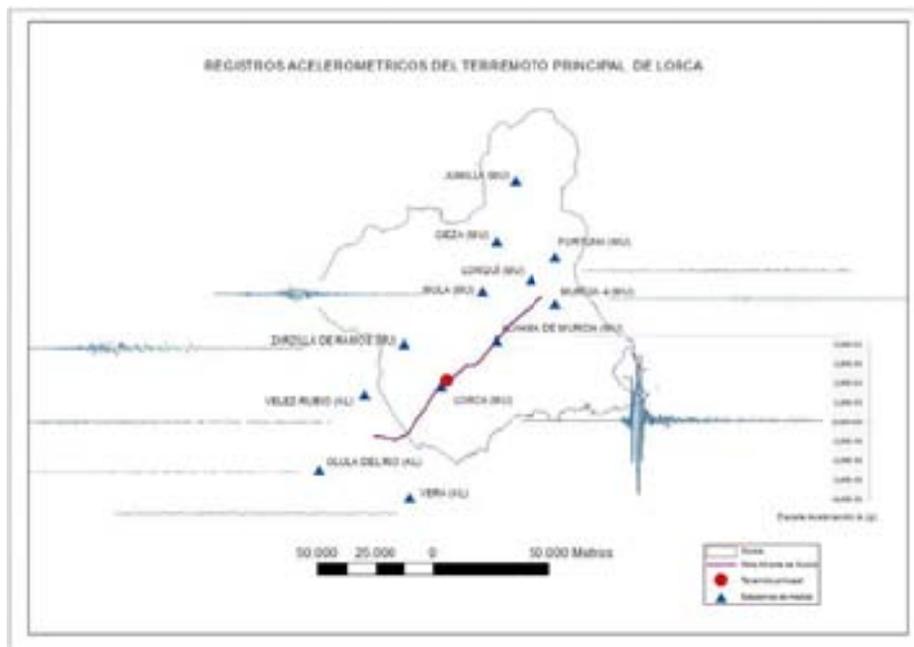


Figura 4.9. Distribución geográfica de registros de movimiento fuerte en estaciones del IGN para el evento principal del 11 de Mayo de 2011, con Mw 5.1.

#### 4.4.1. Modelización del movimiento fuerte

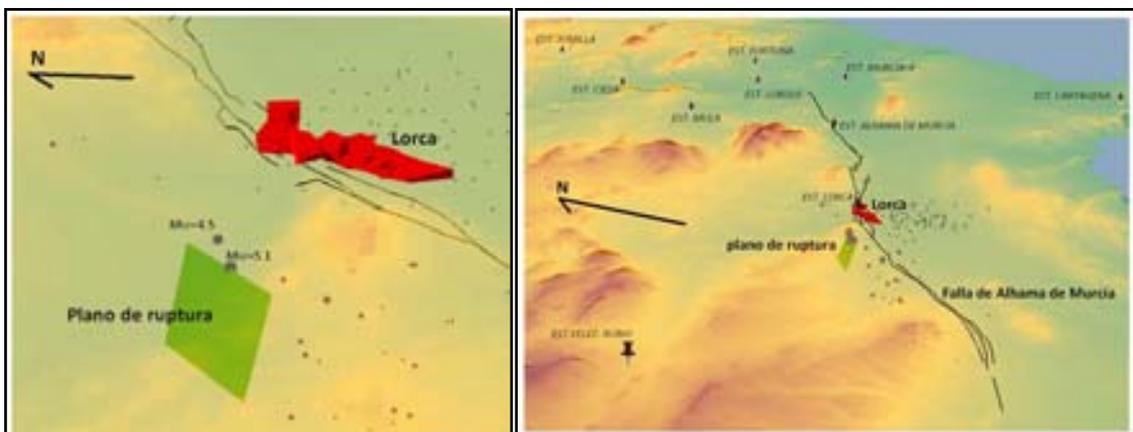
Con objeto de valorar si los niveles de movimiento registrado se ajustan o no, a los predichos habitualmente de forma empírica por medio de los modelos de movimiento fuerte, que se utilizan después en el cálculo de la peligrosidad, se presenta una simulación del movimiento esperado en la ciudad de Lorca. Esta simulación se realiza bajo la hipótesis de que el plano de ruptura del evento principal del 11 de mayo de 2011, está situado en la falla de Alhama de Murcia (Figura 4.10) y adoptando los modelos existentes en la literatura, que reúnen mas consenso científico y al mismo tiempo resultan más adecuados para la zona en la que se realiza la aplicación.

##### Plano de ruptura

El plano de ruptura del evento principal se ha situado en la falla de Alhama de Murcia (figura 4.10) por su localización y por la similitud de su geometría con uno de los planos nodales de la solución del mecanismo focal obtenida por el IGN.

Las características del plano de ruptura son:

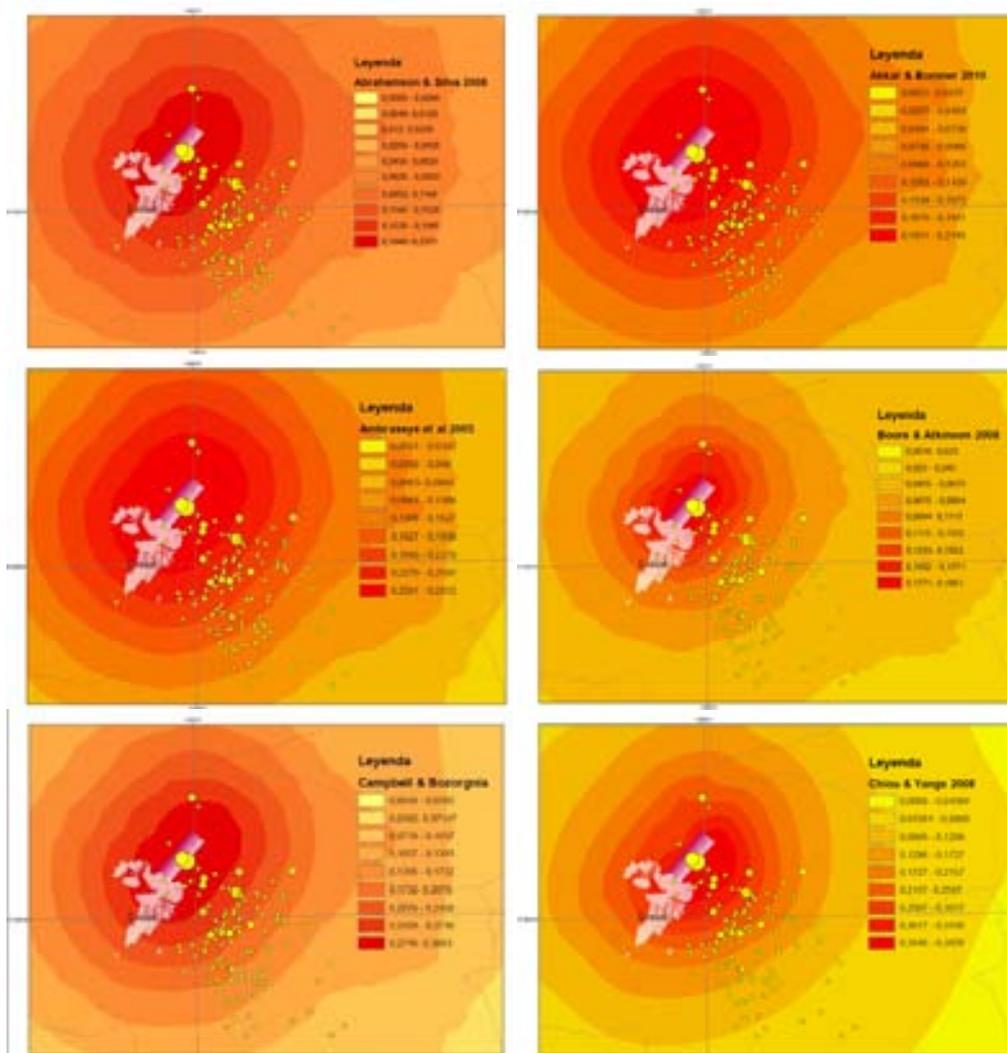
- Geometría Rectangular
- Techo ruptura a una profundidad de 1 km
- Longitud (L) 3.451k m
- Anchura (W) 3.027 km
- Azimut 230º
- Buzamiento (dip) 69º
- Deslizamiento (rake) 33º
- Coordenadas epicentro (UTM) X= 617029 m Y= 4173277 m
- Magnitud  $M_w = 5.1$



**Figura 4.10.** Vistas del plano de ruptura del sismo principal del 11 de mayo de 2011 (verde) y localización del núcleo urbano de Lorca (rojo).

## Modelos de movimiento fuerte

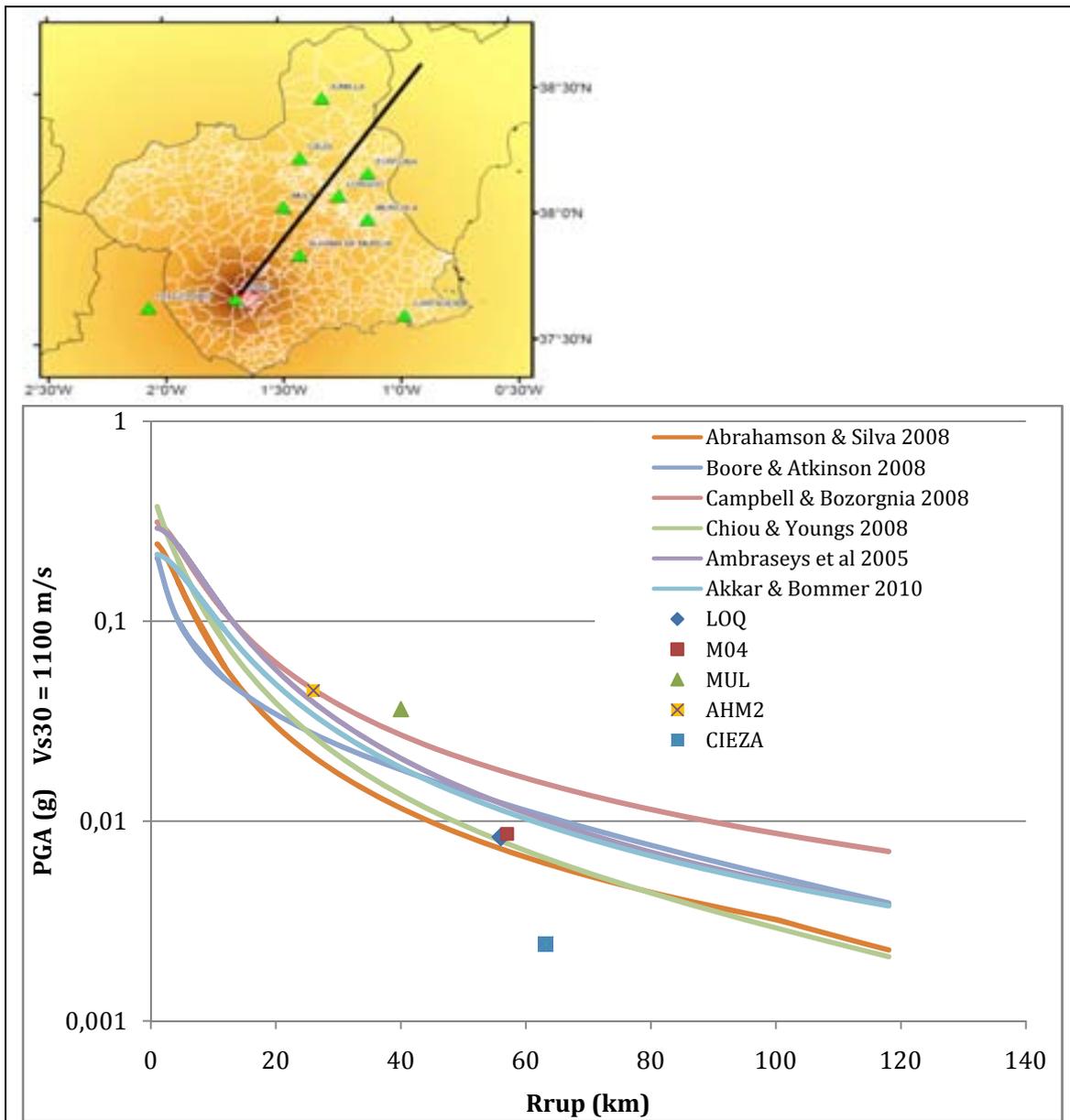
Se utilizan varios modelos de movimiento fuerte para estimar la atenuación de la PGA con la distancia. Éstos corresponden a cuatro modelos NGA (Boore y Atkinson 2008, Abrahamson y Silva 2008, Chiou y Youngs 2008 y Campbell y Bozorgnia 2008), elegidos por el grado de detalle que permiten introducir en la modelización de la fuente, y a dos modelos europeos recientes (Ambraseys et al. 2005 y Akkar y Bommer 2010). Se ha considerado un tipo de suelo uniforme con velocidad de onda de cizalla promedio para los 30 primeros metros de  $V_{S30}=1100$  m/s, lo que equivale a considerar un suelo duro. Los resultados se muestran en la figura 4.11., donde puede observarse la aceleración predicha por cada modelo junto con el mapa de epicentros de la serie (localización IGN) en círculos amarillos y las posiciones del núcleo urbano de Lorca y del plano de falla (en rosa y magenta).



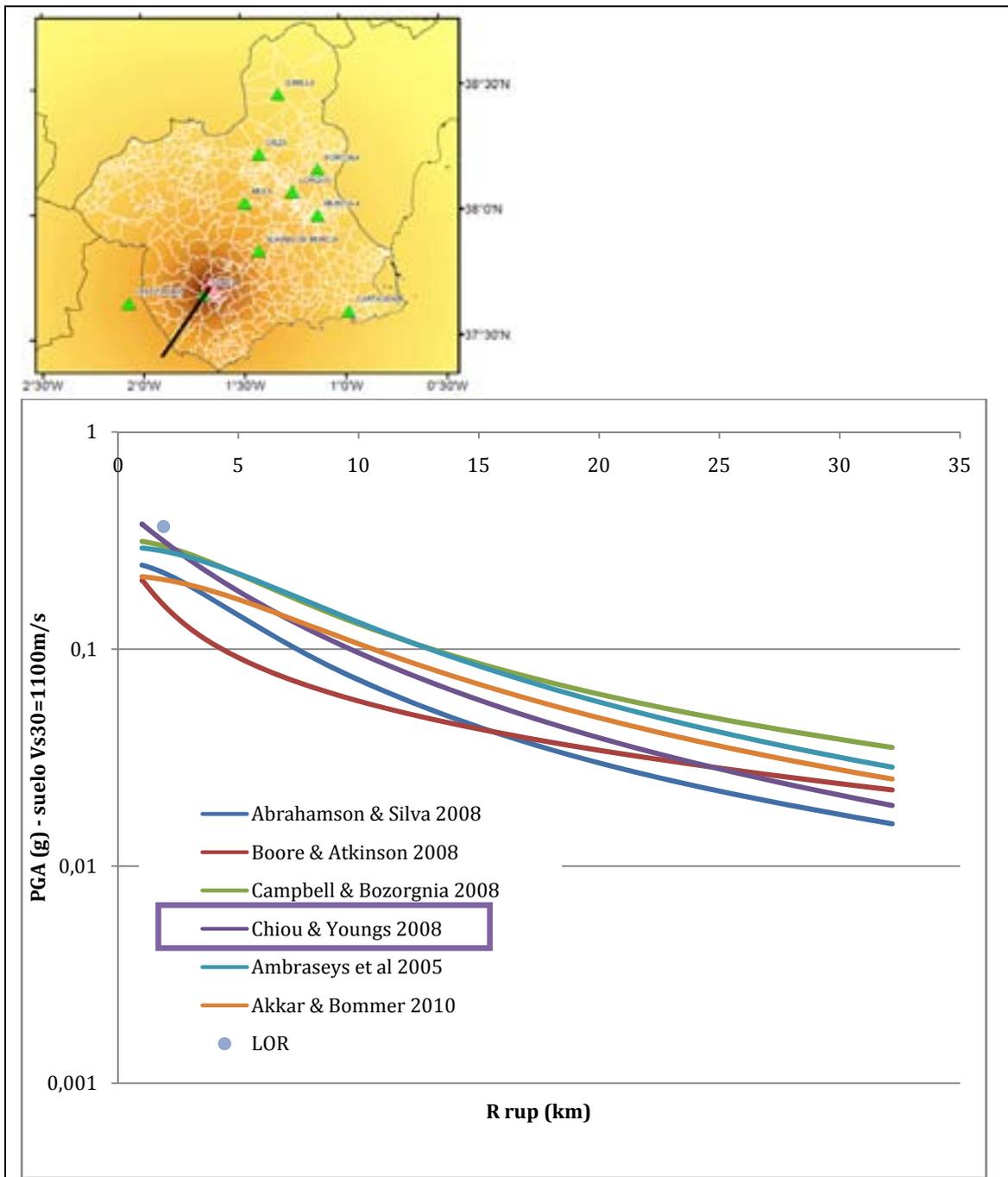
**Figura 4.11.** PGA estimada para el sismo principal del 11 de mayo de 2011 con los modelos de Abrahamson y Silva 2008, Akkar y Bommer 2010, Ambraseys et al. 2005, Boore y Atkinson 2008, Campbell y Bozorgnia 2008 y Chiou y Youngs 2008 (de arriba izq. Abajo dcha.) junto con el mapa de epicentros de la serie (localización IGN) en círculos amarillos y las posiciones del núcleo urbano de Lorca

y del plano de falla (en rosa y magenta).

Se observa que el modelo de Chiou y Youngs 2008 es el que da valores más altos a distancias muy cortas y atenúa más rápidamente, tal como ha sucedido en el caso del terremoto de Lorca. Este efecto se observa también al representar los valores de PGA observados en distintas estaciones acelerométricas de la zona a lo largo de dos líneas trazadas en dirección NE y SW con respecto al epicentro (Figuras 4.12. y 4.13. respectivamente).



**Figura 4.12.** Valores de aceleración pico (PGA) registrados en diversas estaciones para el terremoto de Lorca de 2011 en dirección NE (símbolos puntuales), junto con los valores predichos por los modelos de movimiento fuerte considerados en análogas condiciones de magnitud y distancia.



**Figura 4.13.** Valores de aceleración pico (PGA) registrados en diversas estaciones para el terremoto de Lorca de 2011 en dirección SW (símbolos puntuales), junto con los valores predichos por los modelos de movimiento fuerte considerados en análogas condiciones de magnitud y distancia.

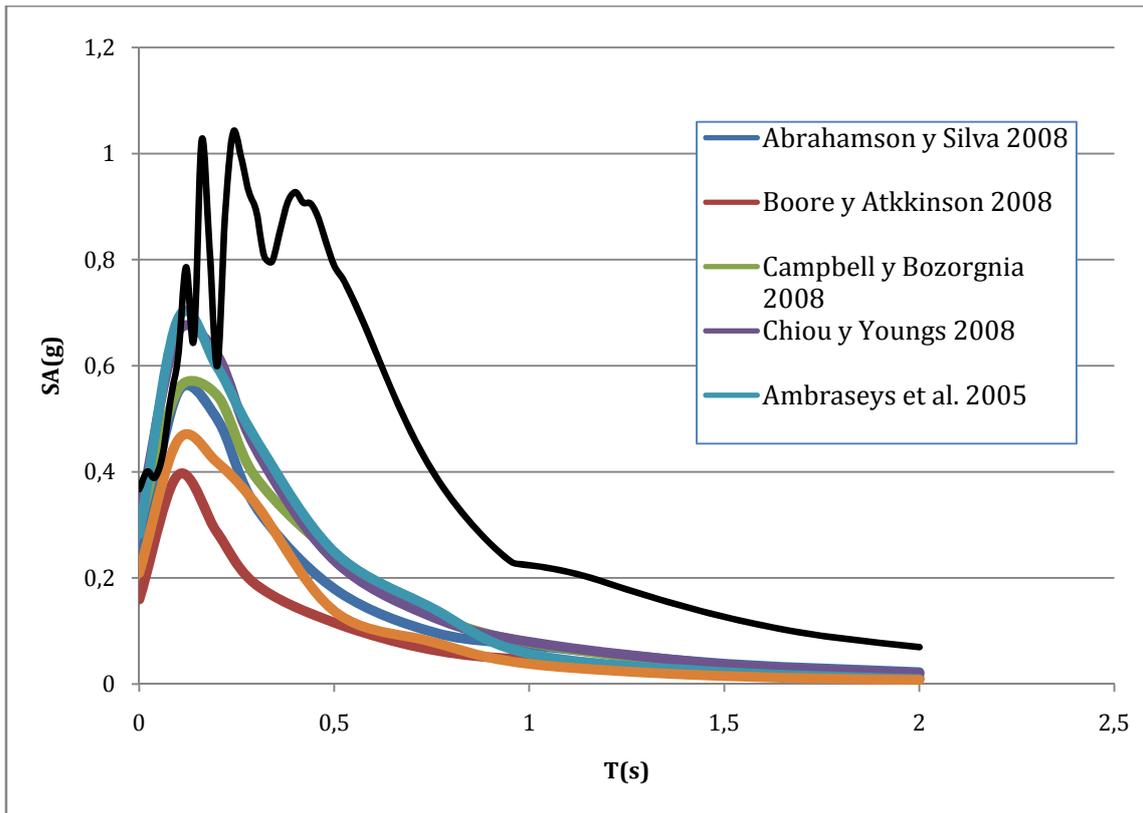
Se observa que el valor de PGA registrado en Lorca, a muy corta distancia epicentral y prácticamente dentro del plano de ruptura, excede al dado por todos los modelos, siendo el predicho por Chiou and Youngs (2008) el que más se aproxima (Figura 4.13.).

Sin embargo, a distancias superiores a 20 km, ya fuera del plano de ruptura, las aceleraciones registradas son del orden o incluso inferiores a las predichas (Figura 4.12.).

Un hecho similar ha sido observado en otros terremotos recientes, con magnitud moderada como L'Aquila (2009) de Mw 6.3 y Christchurch (2011) también de Mw 6.3. Las aceleraciones registradas dentro del plano de falla se disparan, siendo muy superiores a las predichas por los modelos, y sin embargo decrecen con rápida atenuación a distancias superiores a 20 km. Todo parece confirmar la existencia de un cierto "Efecto fuente", que puede ser debido a directividad de la ruptura, fases de parada u otros factores a investigar, dando como resultado aceleraciones anormalmente altas dentro del plano de falla. Estas aceleraciones no son bien predichas por los modelos de movimiento fuerte, generalmente deducidos por ajuste de regresión de datos reales a distancias mayores, de modo que el rango de distancias cortas, correspondientes al plano de ruptura, no queda bien cubierto por los modelos. También puede deberse a un efecto de la profundidad, que se manifiesta en sismos muy superficiales. Gran parte de los modelos se desarrollan para profundidades medias, del orden de 10 km, y si el sismo tiene profundidad muy inferior, como el caso de Lorca donde se estima que ésta fue de 1 a 3 km, esa diferencia puede explicar también la diferencia en las aceleraciones predicha y registrada. En el campo próximo la aceleración es muy sensible a la profundidad del sismo.

Este hecho tiene una gran trascendencia en el cálculo de la peligrosidad, basado en la estimación de la aceleración por medio de modelos de movimiento fuerte. Si esos modelos infraestiman la aceleración en el plano de ruptura, la peligrosidad que resulta en el entorno de la falla es también infraestimada y las correspondientes aceleraciones son menores que las reales. El caso tiene una importancia especial cuando una población se encuentra en el plano de la falla, como ocurre en Lorca, porque entonces las aceleraciones que se introducen en el diseño pueden estar siendo muy inferiores a las que genera el terremoto a distancias muy cortas. Este podría ser un factor que contribuye a explicar el importante daño observado en estructuras recientes, construidas supuestamente al amparo de la normativa.

Finalmente, los espectros registrados en la estación de Lorca (LOR) se comparan con los predichos según estos modelos para las mismas condiciones de magnitud y distancia (Figura 4.14.), observándose un claro déficit en las aceleraciones modelizadas para periodos medios-altos en relación a la aceleración registrada (componente NS). La explicación radica en lo ya comentado en el párrafo anterior.



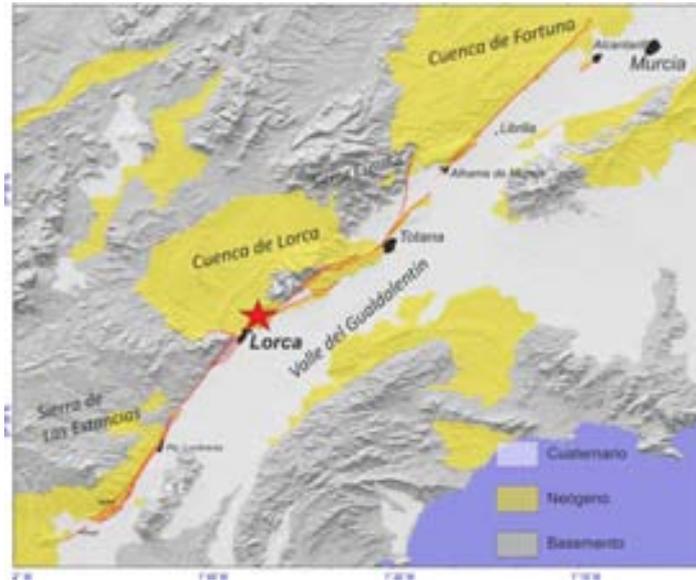
**Figura 4.14.** Comparación entre espectros predichos por los diferentes modelos de movimiento fuerte utilizados y el derivado del registro del sismo principal (componente NS) en la estación de Lorca. El espectro real del movimiento registrado (en negro) excede notablemente a los espectros predichos especialmente para periodos medios-altos.

## 5. GEOLOGÍA DEL TERREMOTO

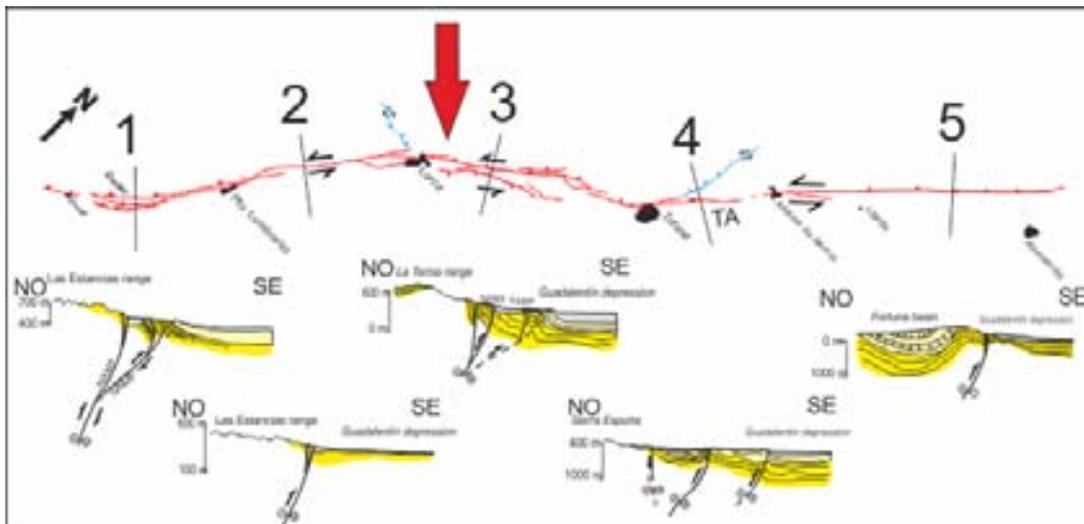
### 5.1. FUENTE GEOLÓGICA

La posición de los epicentros del terremoto principal de magnitud Mw 5.1 así como del terremoto de magnitud Mw 4.5 ocurrido aproximadamente 2 horas antes, como se ve en la Figura 5.1. coinciden espacialmente con la localización de la traza en superficie de la Falla de Alhama de Murcia a unos 2 km al noreste de la ciudad de Lorca. La Falla de Alhama de Murcia tiene un plano de orientación NE-SO inclinado entre 50 y 70 grados hacia el NO; fue descrita por primera vez por Bousquet et al. (1979) y ha sido objeto de numerosos trabajos de carácter estructural y paleosísmico en los que se evidencia su carácter activo y su alto potencial sismogénico. Se trata de una falla de desgarre (es decir que su movimiento principal es en la horizontal) con una componente vertical inversa, se extiende a lo largo del borde NO de la depresión del Guadalentín, desde las proximidades de Alcantarilla hasta los alrededores de Góñar en Almería alcanzando una longitud total de al menos 85 kms.

La falla se encuentra segmentada en varios tramos con direcciones algo distintas (Figuras 5.1 y 5.2). Cuando se produce un terremoto en una gran falla no se reactiva toda ella sino solamente uno de esos tramos denominados segmentos o parte de él. El terremoto de Lorca al ser de magnitud moderada habría ocurrido en un límite entre dos de esos segmentos: el Góñar-Lorca y el Lorca-Totana. Es importante tener esto en cuenta puesto que el cambio de esfuerzos generado por este terremoto de Lorca puede influir en el estado de esfuerzos de esos dos segmentos. Es necesario profundizar en el estudio de esa influencia para cuantificar si dichos segmentos han podido quedar desestabilizados y ser potenciales generadores de terremotos de tamaño similar o incluso superior.



**Figura 5.1.** Cartografía de la traza de la Falla de Alhama de Murcia. La estrella indica la posición del epicentro del terremoto de magnitud Mw 5.1.

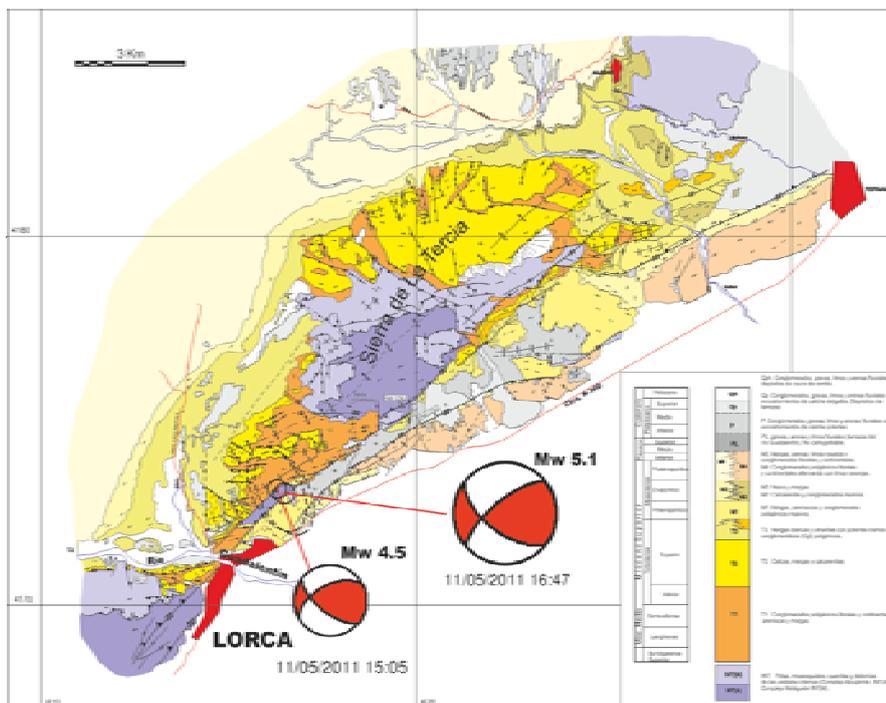


**Figura 5.2.** Estructura segmentada de la Falla de Alhama de Murcia tomada de Martínez-Díaz et al. (2010). La flecha roja marca la posición del epicentro del terremoto de 5.1 que se localiza en la terminación CO del segmento Lorca-Totana. En la parte inferior se muestra la estructura de la falla en profundidad interpretada a partir de datos geológicos de superficie en varias secciones a lo largo de la falla.

En el mapa de la figura 5.3. puede apreciarse que los epicentros de los dos terremotos de mayor magnitud (4,5 y 5,1) parecen relacionados a una zona donde la FAM presenta una estructura algo compleja, con dos ramas principales de buzamientos

opuestos en superficie. Los epicentros podrían localizarse en cualquiera de las dos ramas, si bien parece más probable su localización asociada a al Corredor Norte. Este corredor está formado por una estructura doble formada a su vez por dos ramas paralelas muy próximas en superficie y cuyas trazas pasarían una por debajo del casco urbano de Lorca y otra por el flanco NO del cerro del Castillo de Lorca (ver figura 5.4.). En todo caso la estructura de la falla a su paso por Lorca es bastante compleja, sufre un ligero cambio de dirección y podrían existir varias ramas activas de la falla en el sustrato del casco urbano. La elevada aceleración registrada antes descrita y la intensidad de los daños son coherentes con esta cercanía de la falla.

Por otra parte, la geometría y tipo de movimiento de uno de los dos planos de los dos mecanismos focales (plano de dirección NE-SO con elevada inclinación hacia el NO que representan las esferas de la figura 5.3.) presenta clara coincidencia con la geometría de las ramas que forman la falla de Alhama de Murcia que además tiene un movimiento de tipo desgarre con cierta componente de tipo inversa (levantando el bloque noroeste), que es también coherente con los mecanismos. Por tanto, tanto la estructura local de la falla, como la posición del epicentro y la geometría del mecanismo focal apuntan a la Falla de Alhama de Murcia como la responsable del terremoto aquí tratado. Hay que destacar que en estudios paleosísmicos previos se han identificado terremotos prehistóricos en esta falla de magnitudes incluso superiores, mayores de 6.0.



**Figura 5.3.** Mapa geológico del sector Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia sobre el que se han proyectado los epicentros de los dos terremotos mayores de la serie sísmica, y las esferas de los

*mecanismos focales calculados por el Instituto Geográfico Nacional. La cartografía geológica está tomada de Martínez-Díaz (1998).*



**Figura 5.4.** Vista panorámica de la ciudad de Lorca tomada desde la zona del epicentro. Las trazas rojas muestran la posición de las trazas principales de la FAM a su paso por Lorca. Las dos fallas que se dirigen hacia el pueblo forman el dúplex de desgarre que forman un bloque de rocas de basamento metamórficas levantadas y rodeadas por rocas sedimentarias miocenas. Se han marcado como referencia varios puntos singulares de la ciudad.

## 5.2. EFECTOS GEOLÓGICOS

Cualquier terremoto de cierta magnitud genera una serie de efectos geológicos superficiales que en caso de ser reconocidos, cuantificados y cartografiados aportan una información de gran valor para poder conocer la falla responsable del terremoto y sus características. Recientemente se han sistematizado estos efectos a través de una escala de intensidades denominada ESI-07: “Environmental Seismic Intensity Scale” (Michetti et al., 2004; Silva et al., 2008). Estos efectos pueden estar asociados al movimiento de la falla que genera el terremoto y/o a la vibración del terreno generada por el mismo. Los tipos de efectos concretos pueden ser muy numerosos pero entre los más comunes para los terremotos de cierta magnitud están: la formación de escarpes en el suelo por rotura superficial de la falla (solo cuando el terremoto es muy grande), inestabilidades de ladera, efectos hidrogeológicos (cambios de nivel freático y caudal de fuentes por ejemplo), grietas en el terreno, procesos de licuefacción, etc. A continuación se describen algunos de los efectos reconocidos.

### **5.2.1. Análisis de la posible ruptura superficial**

La poca profundidad del hipocentro calculado por el Instituto Geográfico Nacional para el terremoto destructivo de magnitud Mw 5.1, que es coherente con la gran intensidad de los daños, hizo pensar en un principio en la posibilidad de que pudieran identificarse algunos efectos ambientales de interés, en concreto quizá el más importante como es que la ruptura sísmica a lo largo de la Falla de Alhama de Murcia hubiera alcanzado la superficie y pudiera verse en el terreno. Teniendo en cuenta la magnitud del terremoto y suponiendo una rotura muy superficial como la calculada por el IGN, el desplazamiento no habría superado unos pocos centímetros, por ello se realizaron durante los tres días siguientes al sismo un extenso reconocimiento de campo por parte de un grupo de geólogos de varias universidades y del Instituto Geológico y Minero de España por toda la zona epicentral y a lo largo de la traza de la falla, prestando especial atención en estructuras y elementos artificiales como firmes de carreteras, pistas prensadas o vallados de hormigón en los que pudieran quedar preservados pequeños desplazamientos centimétricos asociados a la ruptura en la falla. En la imagen de satélite de la figura 5.5. se han proyectado los recorridos de inspección realizados a pie y en vehículo durante esos días siguientes al evento.

Estos recorridos han permitido observar que los efectos superficiales más importantes han sido las inestabilidades de ladera que más abajo se detallarán. Sin embargo, hasta la fecha de redacción de este informe no se ha detectado ruptura superficial de la falla, lo que parece apoyar que, a pesar de escasa profundidad del hipocentro, la ruptura no ha llegado a afectar al suelo del núcleo urbano de Lorca ni de los alrededores, en cuyo caso los daños abrían sido mucho mayores. Es necesario sin embargo realizar aún estudios fundamentalmente usando imágenes de RADAR posteriores al terremoto para poder descartar o no la existencia de deformaciones superficiales a lo largo de la falla.



**Figura 5.5.** Imagen de satélite de la zona de Lorca en la que se marca en rojo la posición de la traza superficial de la Falla de Alhama de Murcia, con un círculo amarillo el epicentro del terremoto, y en línea amarilla intermitente los recorridos de inspección realizados hasta el momento con el fin de identificar y cuantificar efectos geológicos superficiales.

### **5.2.2. Inestabilidades de ladera**

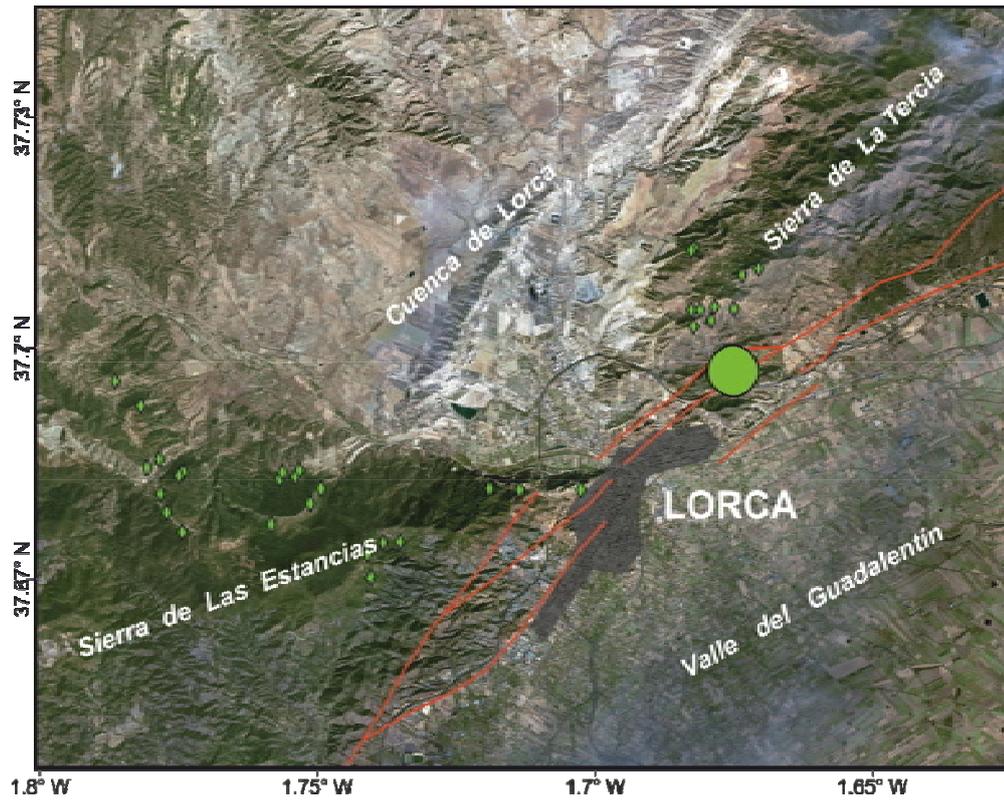
La serie sísmica del 11 de Mayo de 2011 ha generado una serie de inestabilidades de ladera que se distribuyen en una superficie de al menos 50 km<sup>2</sup>, la mayor parte localizadas en el entorno de la ciudad de Lorca, en la sierra de Las Estancias y en la sierra de La Tercia. Las inestabilidades del terreno producidas por el terremoto han sido básicamente: desprendimientos rocosos de diferente entidad (desde meros desconchones hasta desprendimientos con flujo de rocas), caída de bloques independientes, a veces de grandes dimensiones y desmoronamientos de tramos de la muralla exterior del castillo de Lorca. Algunas de las inestabilidades producidas por el terremoto pueden calificarse como significativas en el sentido de que han producido algún daño en edificación y cortes temporales de carreteras. En particular, en la zona del espolón del castillo (extremo este del cerro del castillo), la caída de un bloque rocoso ha destrozado parte de un muro de cerramiento del patio de una vivienda. Así mismo, en la carretera de subida al castillo se han producido caídas de bloques que han dañado seriamente el pavimento de la carretera. Igual situación se ha dado en la carretera de Lorca al pantano de Puentes, implicando el corte de la misma que continuaba en el momento de redactar este informe.

Merece destacarse que las medidas de estabilización del frente rocoso de la falda sur del cerro del Castillo de Lorca han funcionado adecuadamente, evitando lo que hubiera supuesto un agravamiento de los daños producidos por el terremoto, y quizá un mayor número de víctimas, en particular en las viviendas situadas justo debajo del acantilado. Una revisión ocular rápida sugiere el perfecto estado de las medidas, aunque por supuesto esta observación deberá confirmarse tras una revisión sistemática y pormenorizada.

Finalmente, es conveniente señalar dos trabajos previos muy importantes realizados por el IGME en Lorca:

- Estudio de Peligrosidad y Vulnerabilidad Sísmica en Lorca y su Término Municipal (1992).
- Estudio de Riesgos por Desprendimientos en el Cerro del Castillo de Lorca (1988)

En lo que se refiere a las inestabilidades fuera del entorno cercano a Lorca en la imagen de satélite de la figura 5.6. se han proyectado las inestabilidades de ladera identificadas (puntos verdes de la figura). Como puede verse la mayor parte se sitúa en crestas de rocas duras calcáreas que forman los cerros en los bordes de la cuenca de Lorca. En las fotos de la figura 5.7. se muestran algunos ejemplos de caídas de bloques importantes, algunos en zonas con alta peligrosidad por ser zonas transitadas por vecinos y senderistas. Como se ve en el mapa caídas de este tipo se han dado a más de 10 km de distancia del epicentro del terremoto. Es fundamental sin embargo realizar una catalogación completa de los desprendimientos producidos por el sismo mediante el análisis de imágenes de satélite de alta resolución tomadas posteriormente al evento con el fin de detectarlos en aquellas áreas de difícil acceso. Una buena cartografía de estos efectos es de gran importancia para entender el patrón espacial de radiación de la energía generada por el terremoto. En este sentido y de forma preliminar parece observarse que la mayor parte de los efectos del terremoto se localizan al oeste del epicentro. Este hecho puede indicar la existencia de *directividad*, es decir que la rotura se propagó a lo largo de la falla desde el epicentro hacia la ciudad de Lorca, lo que pudo agravar sus efectos.



**Figura 5.6.** Imagen de satélite del entorno Lorca en la que se marcan con puntos verdes las inestabilidades implicando caídas de bloques de más de  $1 \text{ m}^3$  identificadas durante la campaña de reconocimiento.

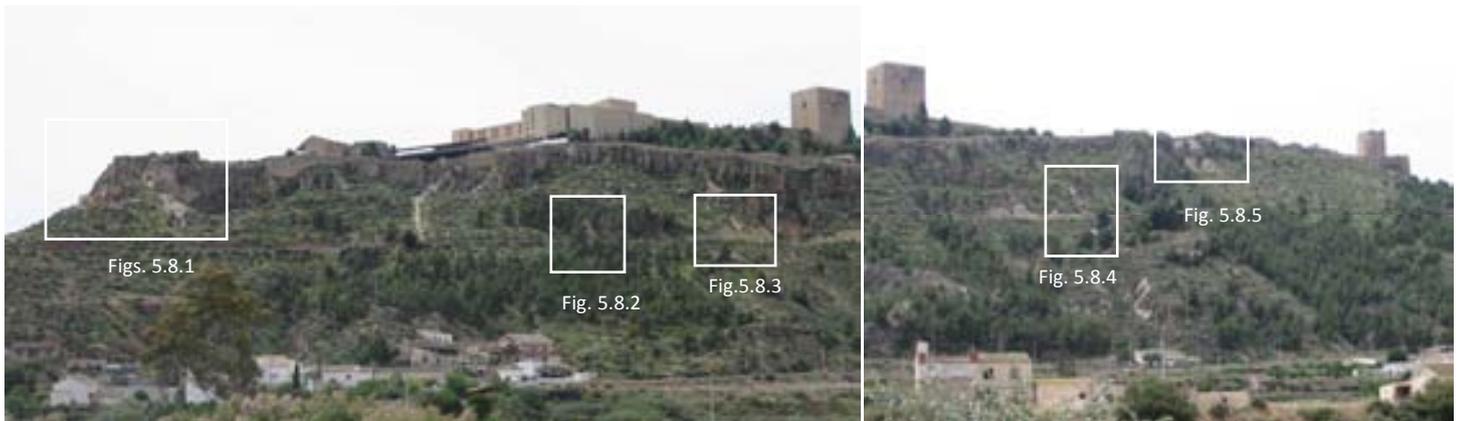


**Figura 5.7.** Fotografías de algunos ejemplos de caídas de bloques inducidas por el terremoto en diversos puntos de la Sierra de Las Estancias. Arriba a la izquierda en la Rambla de los 17 Arcos, a más de 10 km al NO de Lorca. A la derecha desprendimientos en la caras SE de Las Estacias con Lorca al fondo. La 4 fotos inferiores son del entorno del cejo de los Enamorados, zona frecuentada por excursionistas a unos 6 km de Lorca.

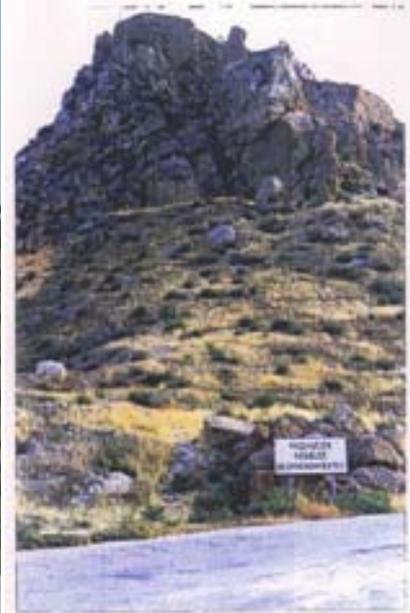
A continuación se presenta un breve reportaje fotográfico de las inestabilidades más próximas al núcleo urbano de Lorca ordenadas por su localización general (la distribución de afloramientos se puede observar en la figura 5.6):

- Falda norte del cerro del castillo de Lorca (Figuras 5.8.0 y siguientes)
- Falda sur del cerro del castillo de Lorca (Figuras 5.8.6 y siguientes),
- Ladera norte de la carretera del pantano de Puentes (Figura 5.8.8 y siguientes),
- Otras fotos (Figuras 5.8.9 en adelante).

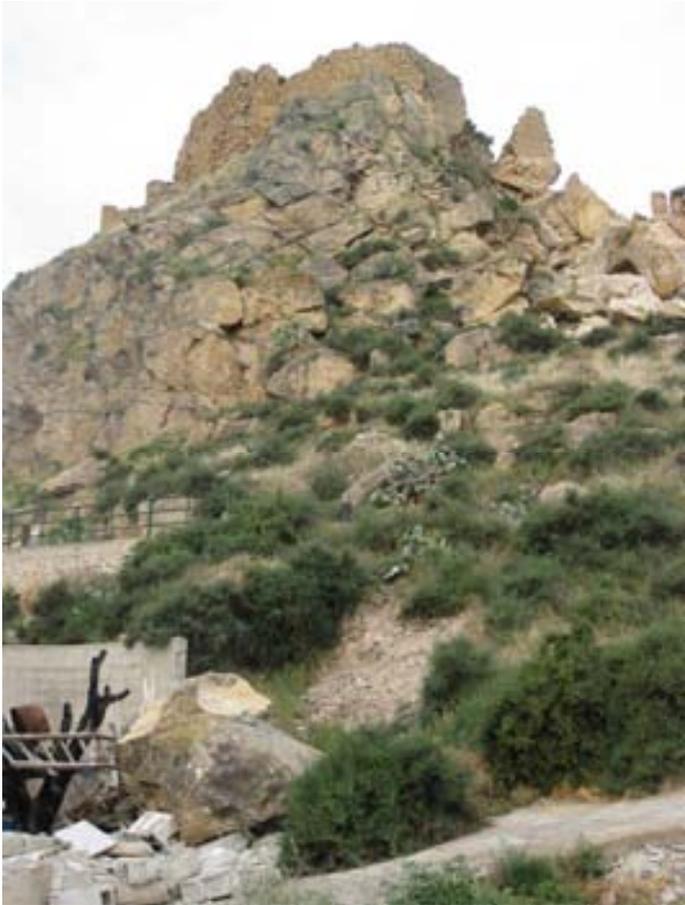
Esta información está extraída del "*Informe Geológico Preliminar del Terremoto de Lorca del 11 de Mayo del año 2011, 5.1 Mw*" realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y colaboradores (disponible en [www.igme.es](http://www.igme.es)).



**Figura 5.8.0** Vista general de la falda norte del cerro del castillo de Lorca. Se identifican las inestabilidades más importantes inducidas por los terremotos del 11 de mayo.



**Figura 5.8.1a** Desmoronamiento parcial del espelón del cerro del Castillo (extremo más oriental del mismo). La caída de un bloque independizado provocó daños en una vivienda (ver Foto 1.2). La imagen de la derecha se corresponde con el mismo lugar y está tomada del estudio de riesgo sísmico de la ciudad de Lorca (IGME, 1992).



**Figura 5.8.1b.** Vista del lateral S del espolón del cerro del castillo y del bloque que causó la rotura de un pequeño muro. En este tramo la carretera de descenso del castillo sufrió daños moderados en el pavimento. Se observa a la izquierda la terminación lateral de la malla de contención que estabiliza el frente norte del cerro.



**Figura 5.8.1c.** Impacto en el muro de bloques de hormigón del patio de una vivienda producido por la caída de una roca del espolón.



**Figura 5.8.1d.** Daños en la carretera de bajada del castillo causados por el rebote del bloque desprendido del espolón (foto 1.b).



**Figura 5.8.1e.** Vista de proximidad del desprendimiento del espolón (hacia el sur) y de las condiciones generales del macizo rocoso en este punto. En el extremo derecha se observa parte de la caída de un muro (ver foto 1.1f).



**Figura 5.8.1f.** Vista de detalle de la caída de parte del muro de contención antiguo. Se observa el relleno de intradós que permanece metaestable. Este tipo de inestabilidad también se ha producido en la falda sur del cerro del castillo (ver foto 2.1).



**Fig.5.8.2.** Pequeño desprendimiento con arrastre de un pino. Talud S de la carretera de subida al castillo.



**Figura 5.8.3.** Desprendimiento de rocas en la carretera de subida al castillo.



**Figura 5.8.4a.** Desprendimiento de un bloque rocoso de dimensiones métricas que provocó daños importantes en la carretera (ver fig 5.8.1b).



**Figura 5.8.4b.** Daños en el pavimento de la carretera de subida del castillo por la caída y rebote del bloque rocoso de la foto 1.4a.



**Figura 5.8.5** Colapso de la muralla exterior del castillo de Lorca (falda N del cerro del Castillo).

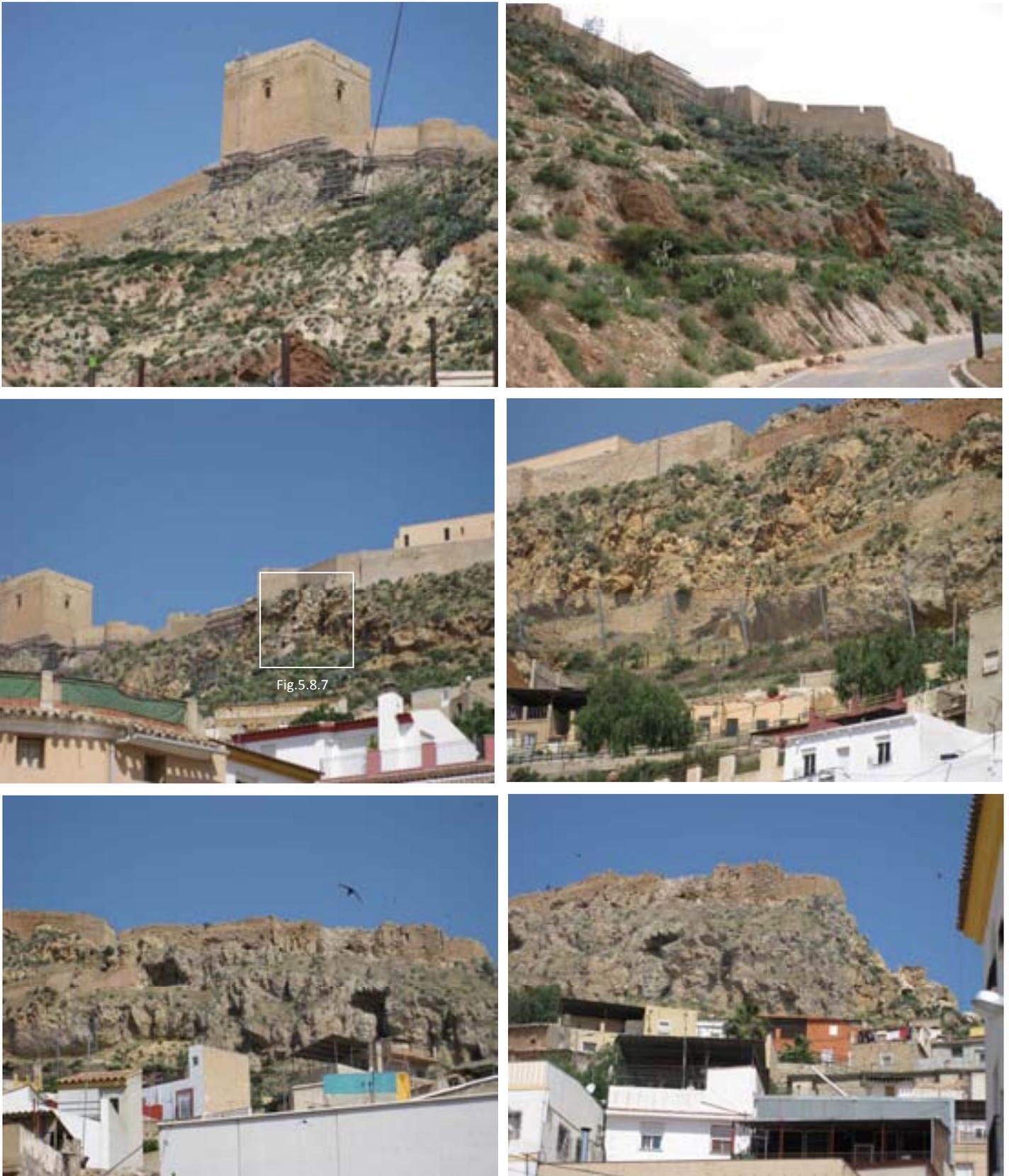


Fig.5.8.7

**Figura 5.8.6.** Vistas parciales de la falda norte del cerro del castillo de Lorca. El orden de las fotos es de oeste a este de izquierda a derecha. Solamente se han identificado dos pequeñas inestabilidades, una pequeña caída de rocas (foto núm. 2) y un desmoronamiento del muro exterior (foto núm. 3 y foto 2.1). En la última foto se aprecia una visual del desprendimiento del espolón (fotos 1.1). Las medidas de estabilidad del macizo rocoso respondieron adecuadamente evitando mayores pérdidas y desgracias personales. Estas consisten en una malla de acero de doble diámetro cosida con bulones y una barrera dinámica. Las medidas fueron implantadas hace unos 3 años (comunicación personal Ayuntamiento de Lorca).



**Figura 5.8.7** Desmoronamiento de un antiguo murete de contención adosado a la muralla exterior del castillo de Lorca en su falda N. Esta inestabilidad alertó a los habitantes de las viviendas situadas más abajo, preguntándonos in situ si era seguro volver a sus viviendas.



**Figura 5.8.8a** Desprendimientos en la parte alta de la ladera norte de la carretera al pantano de Puentes. La atribución de su origen al terremoto del 11 de mayo se presupone. El de más hacia el oeste (a la derecha en la primera foto) se corresponde en parte con una inestabilidad previa.



**Figura 5.8.8b** Continuación de la carretera del pantano de Puentes hacia el oeste. A lo largo de la misma se han identificado numerosas inestabilidades, aunque de pequeña entidad. Destaca la caída de bloques con origen en la cresta rocosa controlada por la falla de Las Viñas (señalado con una flecha). En la foto de la derecha se observa un detalle de los daños producidos por la caída de uno de estos bloques.



**Figura 5.8.9** Desprendimientos en el Cejo de los enamorados.



**Figura 5.8.10** Cerro con antenas de comunicaciones situado en frente de la terminación oriental del cerro del castillo de Lorca. Se observan dos desprendimientos recientes que se atribuyen a los terremotos del 11 de mayo.



**Figura 5.8.11** Vista de la ladera en un depósito de bombonas de gas en la carretera del pantano de Puentes. No se han identificado inestabilidades del terreno atribuibles a los terremotos del 11 de Mayo, aunque el desplome del murete de bloques de hormigón sí se atribuye a estos.



**Figura 5.8.12** Balsa de riego localizada en las inmediaciones de los epicentros de los terremotos del 11 de mayo. No se observó ningún daño ni inestabilidades aparentes en el talud del fondo.



**Figura 5.8.13** Caídas de roca en la pista que cruza la zona epicentral



**Figura 5.8.14** Desprendimientos superficiales atribuidos a los terremotos de mayo en un talud de la carretera de servicio del canal Tajo-Segura.

### 5.2.3. Otros efectos

A falta de concluir un estudio más exhaustivo, se han identificado en el entorno de Lorca algunas anomalías hidrogeológicas posiblemente asociadas al terremoto, entre ellas el aumento de caudal de algunas fuentes naturales localizadas sobre todo al NO de Lorca, a lo largo del borde sur del valle del Guadalentín. Estos aumentos son

coherentes con una compresión del terreno en esa zona que habría provocado un ascenso temporal de la presión de fluidos y un aumento en dichos caudales.

Como conclusión de los efectos geológicos atribuidos al terremoto de Lorca podemos decir que a partir del análisis realizado hasta la fecha y a la espera del análisis detallado de la distribución espacial de los mismos en imágenes de satélite posteriores al terremoto podemos asignar una intensidad ESI de VII que es coherente con la intensidad macrosísmica EMS asignada por el Instituto Geográfico Nacional.

## **6. DAÑOS EN LAS EDIFICACIONES**

### **6.1. TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS Y CARACTERÍSTICAS URBANÍSTICAS DE LA CIUDAD DE LORCA.**

#### **6.1.1. Encuadre histórico**

El estrechamiento del Río Guadalentín, donde abandona la Cuenca Alta de Lorca a través de un paso en la Sierra de la Tercia ha sido un sitio escogido desde la antigüedad para vadear el río, convirtiéndose desde hace siglos en un punto privilegiado de comunicaciones. Debemos a la actividad de la Falla de Alhama de Murcia las condiciones privilegiadas de este emplazamiento, caracterizado por un escarpe elevado dotando de excelente visibilidad y seguridad a los habitantes primitivos del Neolítico.

La plaza de Lorca ha tenido una continua ocupación humana desde los últimos 5.000 años, datándose su primera referencia histórica tan sólo dos años después del inicio de la época hispanomusulmana en el año 713, cuando se hace referencia a la localidad de 'Lurqa.' Durante la edad media, Lorca se benefició de su carácter estratégico como ciudad fronteriza entre los reinos hispanomusulmanes y cristianos hasta pasar definitivamente bajo administración castellana en el año 1244.

El terremoto de 1674 provocó cuantiosos daños a la ciudad pero marcó el inicio de un ambicioso programa de reconstrucción, dotando a la ciudad de importantes muestras de arte barroco que permanecen hasta nuestros días.

El municipio de Lorca cuenta con 92.694 habitantes de acuerdo al censo del Instituto Nacional de Estadística del año 2010.

### **6.1.2. Tipologías constructivas características del área de Lorca**

Al tratarse de una ciudad histórica, Lorca posee un parque inmobiliario variado donde conviven tipologías constructivas de edad y naturaleza variada. A la hora de analizar los distintos tipos de edificios, conviene diferenciar entre tipologías tradicionales de construcción, basadas en los principios empíricos de buena práctica constructiva heredada a través de la tradición, y la edificación tecnológica, que empieza a generalizarse en nuestro país a mediados del siglo XX.

#### **Edificación tradicional**

El casco histórico de Lorca está compuesto principalmente por estructuras murarias de mampostería de piedra. Los forjados son de madera, sin que se pueda considerar un efecto diafragma rigidizante. Estas tipologías son consideradas de alta vulnerabilidad debido a la gran masa que poseen y el escaso empotramiento entre los planos murarios.

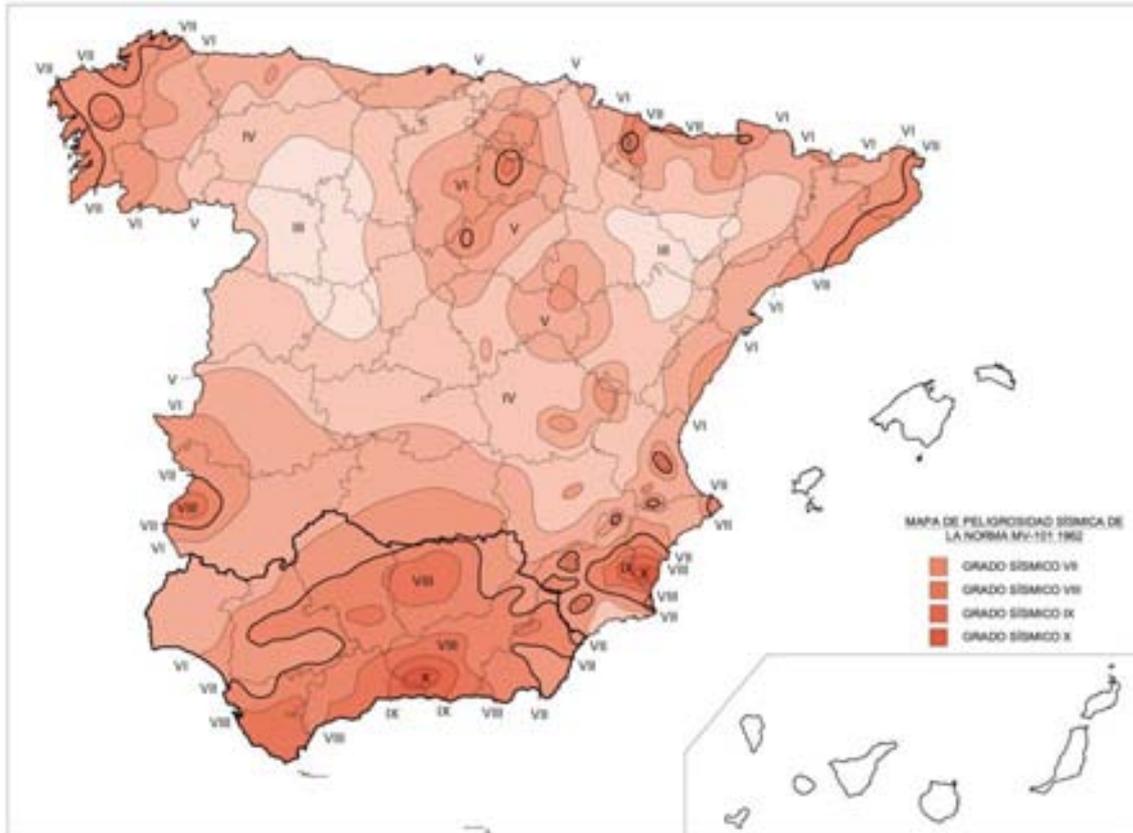
Los edificios singulares como los eclesiásticos y parte de la expansión del siglo XIX poseen fábrica de ladrillo que mejoran el empotramiento entre planos murarios y reducen la masa de la edificación, considerándose por ello menos vulnerables que la edificación de mampostería.

#### **Edificación tecnológica**

A partir de mediados del siglo XX aparecen las normas tecnológicas de obligado cumplimiento. Es una fecha conveniente para diferenciar la edificación tradicional, basada en buenas prácticas constructivas, de la edificación tecnológica donde se definen y calculan las sollicitaciones sobre las estructuras. Asimismo, la aparición de este tipo de estructuras supone un cambio conceptual importante donde el cerramiento del edificio pasa a considerarse no estructural. Dado que el parque inmobiliario de Lorca posee edificios de todas las edades, el análisis de este tipo de estructuras obliga a considerar todas las normas sismorresistentes publicadas hasta la fecha.

### **6.1.3. Normas sismorresistentes nacionales**

La primera norma sismorresistente de ámbito nacional se publica en el año 1962, que adjudica a Lorca un valor de peligrosidad de grado VIII en la escala Mercalli. La norma es renovada en los años 1968; 1974; 1994 y 2002. En las figuras 6.1. a la 6.10. se presentan los mapas de peligrosidad de todas las normas, así como el ámbito de aplicación de la norma para cada uno de ellos para edificios de normal importancia.



**Figura 6.1.** Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente MV-101 1962 (escala intensidad MM).

### COMENTARIO

Se trata de un mapa de clara vocación determinista.

La sismicidad histórica reciente tiene gran peso en la configuración del mapa; así, el mapa se puede considerar como la suma de intensidades máximas observadas. Se pueden identificar en Andalucía eventos específicos de la primera mitad del siglo XX que influyeron determinadamente en la elaboración del mapa, por ejemplo; Serie de Jaén de marzo y mayo de 1951, que provocó la incorporación de una gran zona de  $I=8$  abarcando casi la totalidad de la mitad occidental de la provincia de Jaén, o el terremoto de Montilla de 1930, en el sur de la provincia de Córdoba.

También se observa para la región murciana terremotos individuales como el de Cehegín, (1948) en Lorca y la zona donde se produjeron los terremotos recientes de 2002 y 2005 en La Paca y Zarcilla.

Es notable que había que aplicar la norma ( $\geq 7_{MM}$ ) en localidades específicas de La

Rioja y Álava, pueblos de Soria, la zona occidental de Badajoz y en algún punto muy aislado de los pirineos. Todos hacen referencia a terremotos en los siglos XIX y XX que captaron la atención de los sismólogos. También se observa el gran peso que tuvo los eventos de Torrevieja y Arenas del Rey, cuya prominencia en los mapas de peligrosidad ha perdurado hasta la actualidad.

En cambio no era de aplicación la norma en la totalidad de la provincia de Huelva, casi la totalidad de la de Sevilla y una parte importante de la provincia de Almería. En esta primera norma el mapa no aportaba ninguna información acerca de los grupos insulares.

Lorca poseía un valor de peligrosidad de valor VIII en la escala MM. (Mercalli Modificada)

### CARACTERÍSTICAS DE LA NORMA SISMORRESISTENTE MV-101 1962

#### PRESCRIPCIONES EN TÉRMINOS DE:

Diseño	<input type="checkbox"/>	No hay
	<input checked="" type="checkbox"/>	Estático muy básico aplicado a elementos estructurales.
Cálculo		
Construcción	<input type="checkbox"/>	No hay
Años de vigencia		1964 - 1969
Zona de aplicación		>VII <sub>MM</sub> (>0,03g)

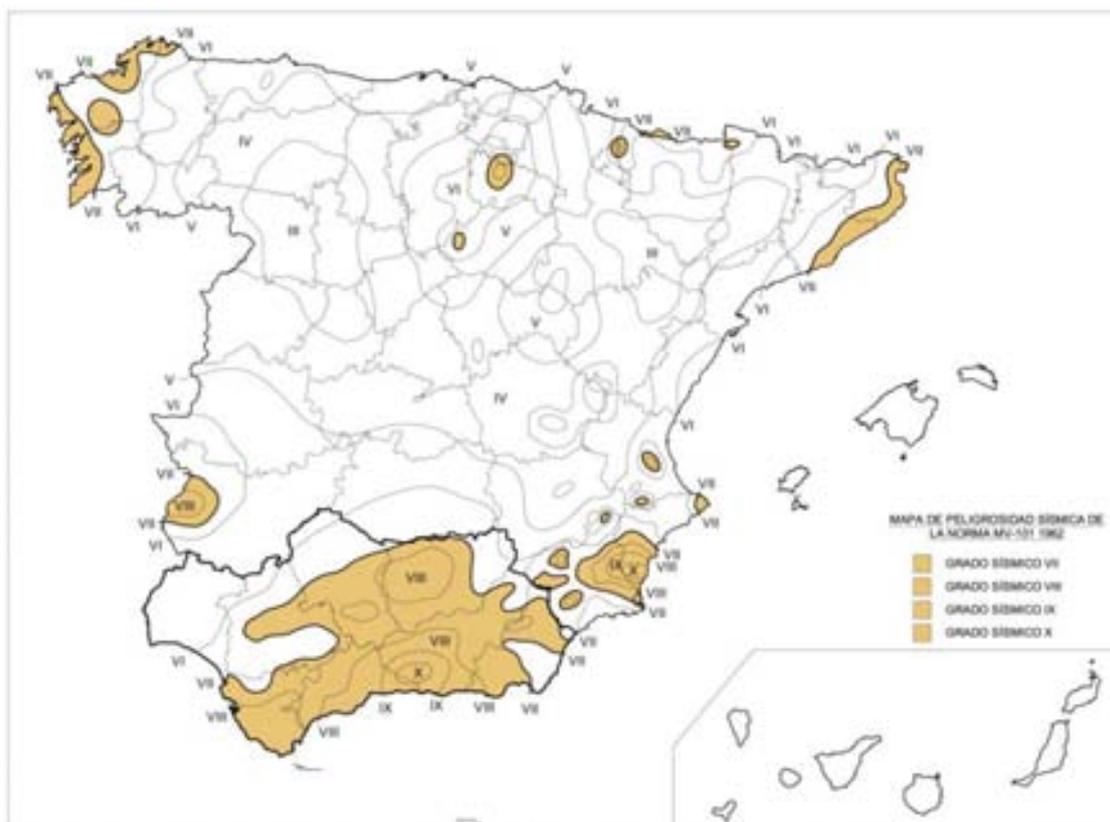


Figura 6.2. Mapa de aplicación de la norma MV-101 1962 para edificios de normal importancia.

## NORMA SISMORRESISTENTE PGS-1 1968

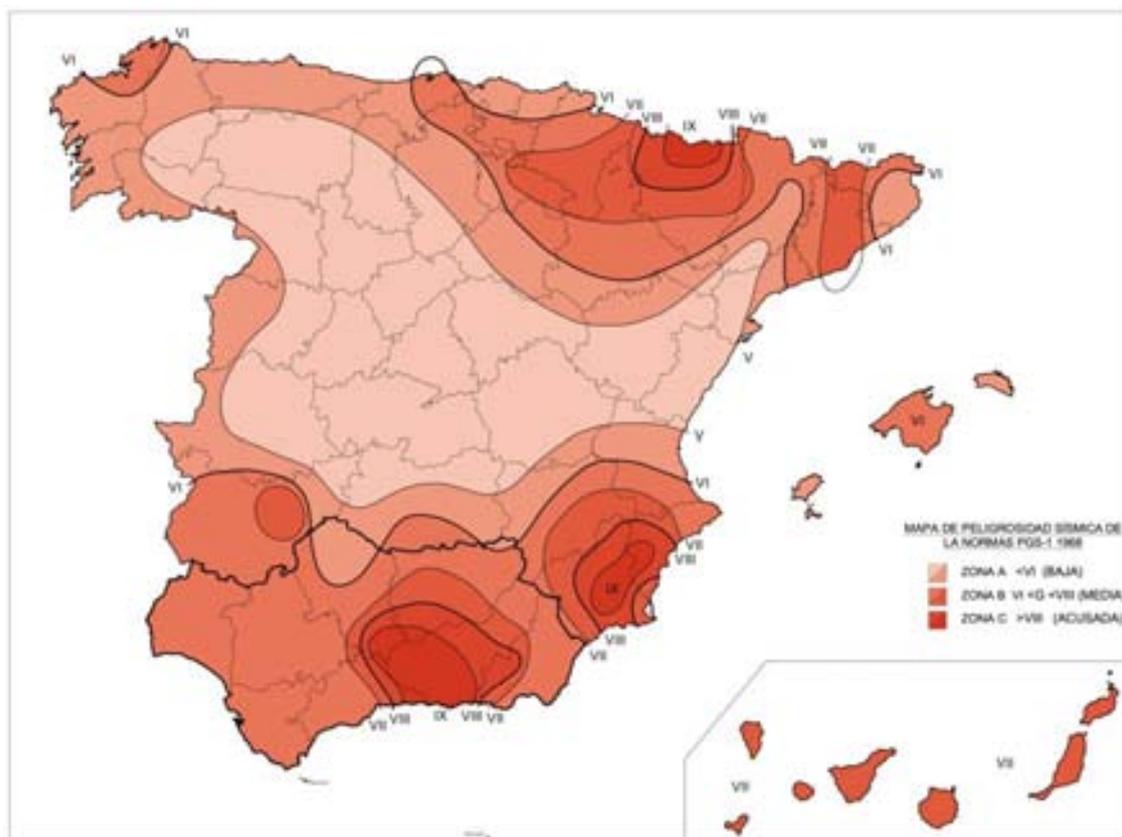


Figura 6.3. Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente PGS-1 1968 (escala intensidad MSK).

### COMENTARIO

A diferencia del mapa de 1962, el de 1968 se basa cada vez más en información sísmológica instrumental.

Las curvas son más generales, definiendo zonas amplias de sismicidad y han desaparecido las referencias específicas a terremotos pequeños o moderados, si bien se mantiene la alta peligrosidad del bajo Segura y Sierra de Tejada. Se definen tres zonas básicas, denominadas de sismicidad Baja, Media y Acusada.

Como novedad con respecto al mapa de 1962 está la incorporación de una amplia zona del pirineo aragonés como zona de sismicidad acusada, y la incorporación de casi la totalidad de Andalucía a zona de sismicidad media.

En 1967 se produce un terremoto de mb 5.3 en Arette, causando daños y víctimas mortales en el pirineo francés, sintiéndose de forma generalizada en el tercio norte peninsular. Sin duda este terremoto influyó en que a partir de 1968 la norma era de aplicación ( $\geq 6_{MSK}$ ) en ciudades como Zaragoza, que en el mapa anterior eran de sismicidad muy baja ( $III_{MM}$ ).

Por primera vez se aporta información sobre las Baleares y Canarias, donde es de aplicación la norma con la excepción de Ibiza y Menorca.



Daños en la población de Arette tras el terremoto de Agosto de 1967.

#### PRESCRIPCIONES EN TÉRMINOS DE:

---

Diseño	<input type="checkbox"/>	No hay
Cálculo	<input checked="" type="checkbox"/>	Estático muy básico aplicado a elementos estructurales.
Construcción	<input checked="" type="checkbox"/>	Muy básicas; por ejemplo armadura 4Ø10 en encadenados de fábrica.
Años de vigencia		1970 - 1976
Zona de aplicación		$>VI_{MSK}$ ( $>0,04g$ )

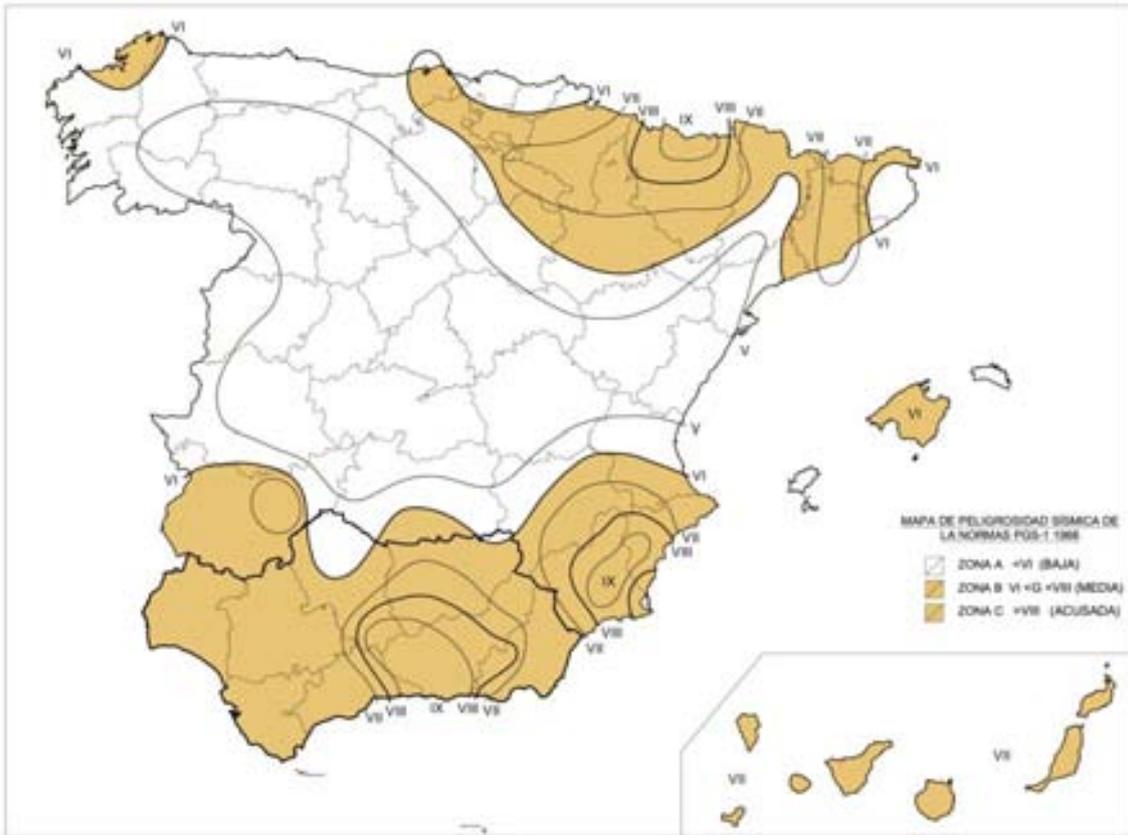
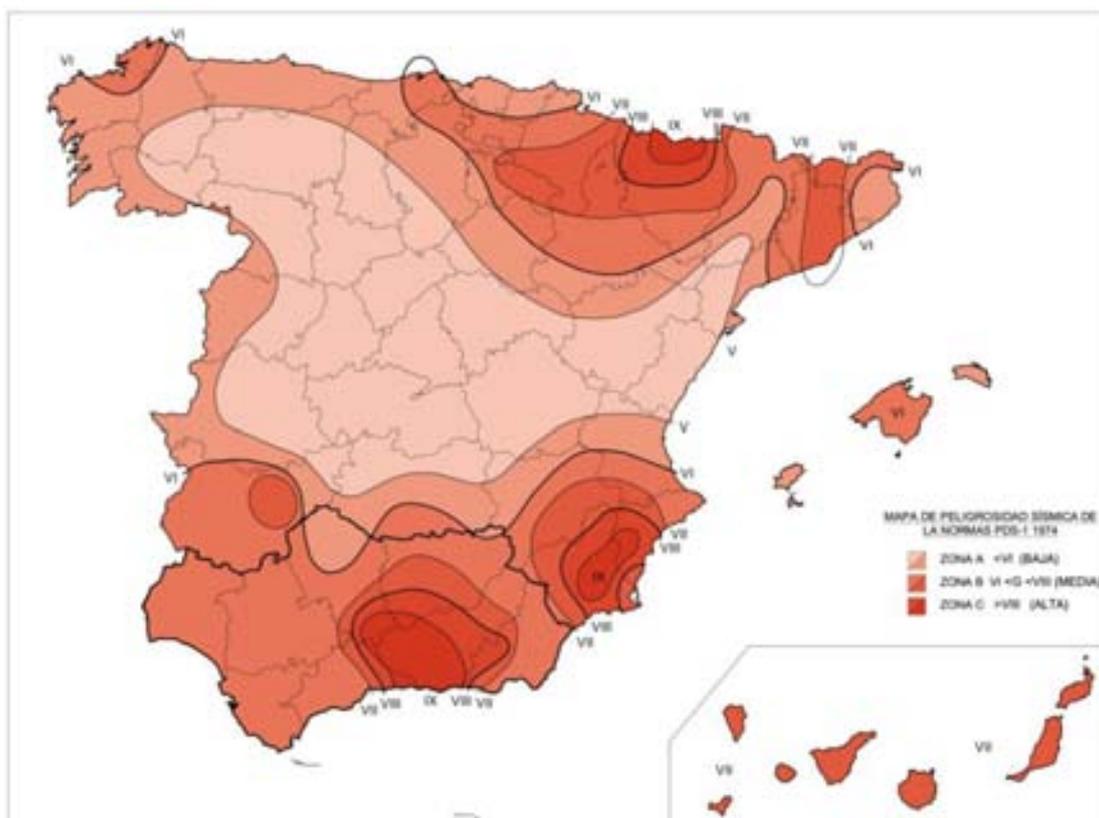


Figura 6.4. Mapa de aplicación de la norma PGS-1 1968 para edificios de normal importancia.

### NORMA SISMORRESISTENTE PDS-1 1974



**Figura 6.5.** Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente PDS-1 1974 (escala intensidad MSK).

### COMENTARIO

Es esencialmente el mismo mapa que el de 1968, con la salvedad que las regiones sísmicas pasan a llamarse la zona primera (sismicidad baja); segunda (sismicidad media); y tercera, (sismicidad alta).

La gran diferencia radica en el ámbito de aplicación de la norma, que en el caso de tipos constructivos de hormigón armado o metálicas, evolucionó a ser de obligado cumplimiento únicamente a partir de la zona tercera (alta), si bien en la zona  $\geq 7_{MSK}$  hay que considerarla en los elementos puntuales como voladizos o marquesinas, etc., pero no en el cálculo estructural.

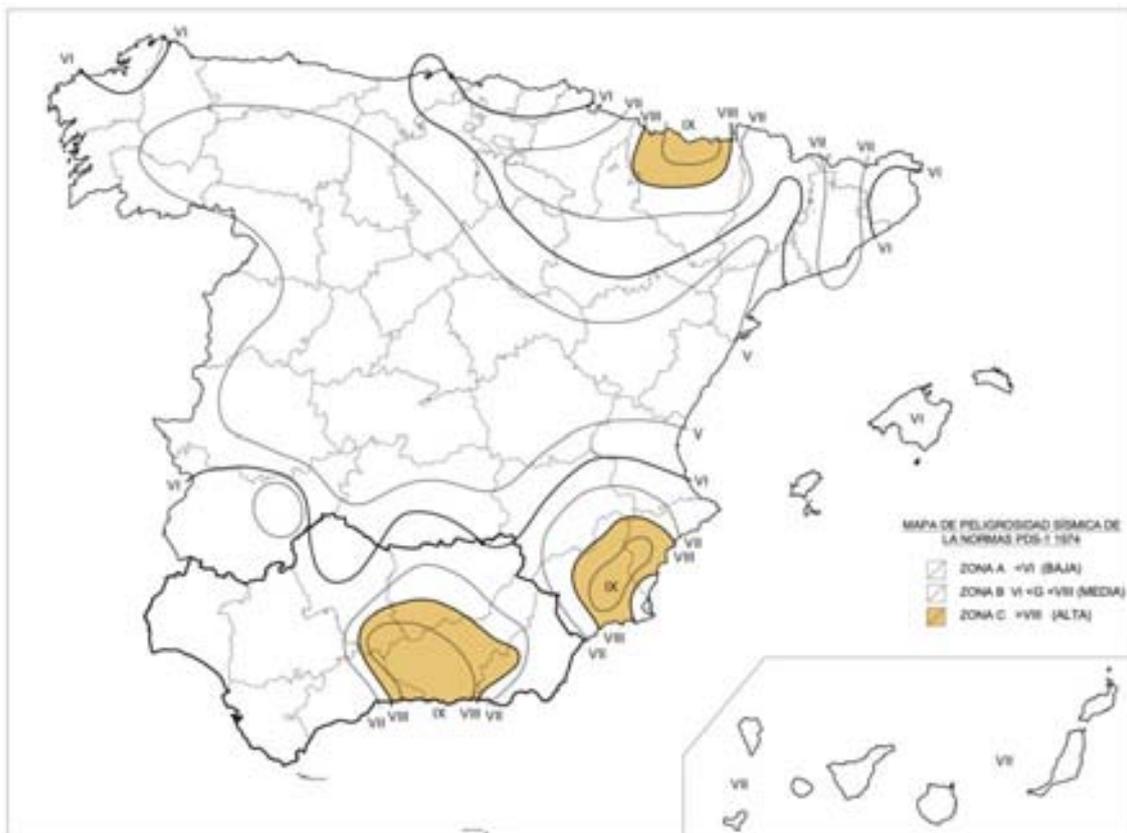
Con la norma se observa el optimismo de la década, y la gran confianza que se ponía en la edificación de hormigón que se hallaba en total expansión. Se consideraba que las solicitaciones por sismo en zonas  $\geq 8_{MSK}$  (0.15g) eran asimilables por otros requerimientos como viento u otras acciones accidentales de obligado cumplimiento.

Esta postura no era excepcional para la época, pero la vigencia de esta norma en el tiempo (20 años) fue excepcional y perjudicial en cuanto a la longevidad de una norma ciertamente desfasada ya al inicio de los años 80.

Sirva como ejemplo que en la ciudad de Almería, - que ha sufrido 5 terremotos

destructores desde 1487 - no fue preceptivo calcular para sismo ningún edificio de importancia normal o bloque de viviendas realizado con estructura de hormigón entre los años 1976 – 1996 durante la vigencia de esta norma en un momento de gran expansión urbanística.

Durante el periodo de vigencia de esta norma, Lorca poseía un valor de peligrosidad VIII MSK.



**Figura 6.6.** Mapa de aplicación de la norma PDS-1 1974 para estructuras de hormigón armado y normal importancia.

## NORMA SISMORRESISTENTE NCSE-94

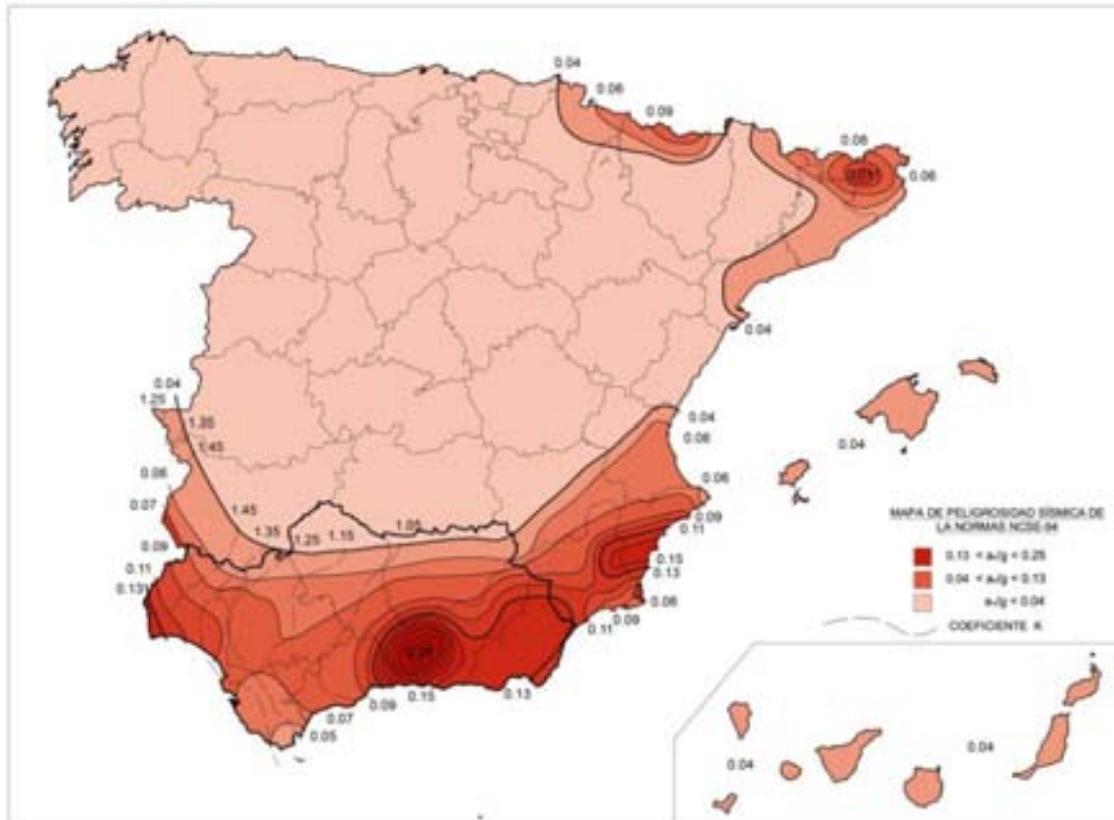


Figura 6.7. Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente NCSE-94

### COMENTARIO

Se trata de la renovación más importante de las NNSS españolas con un gran salto cualitativo.

Es un mapa basado en estudios probabilistas de peligrosidad con los valores presentados por primera vez en datos de aceleración.

Como novedad se incluye para los espectros de respuesta el efecto de terremotos regionales como el evento tipo San Vicente. (Terremoto de Lisboa)

El ámbito de aplicación es a partir de 0,06g para las edificaciones de importancia normal con lo cual grandes zonas de Andalucía vuelven a aplicar la norma. En el resto de zonas, la aplicación de la norma se reduce, desapareciendo de Galicia y retrocediendo en el pirineo.

El gradiente de peligrosidad en Granada sigue siendo un elemento notable del mapa que establece una variabilidad de 0,08 a 0,25 en apenas 65kms. En términos de peligrosidad máxima, se producen los siguientes cambios a los valores de aceleración básica en las tres ciudades de mayor peligrosidad de España:

Lorca es asignado un valor de peligrosidad de 0,12g.

Es interesante también analizar los cambios de otras localidades importantes con respecto a la norma de 1974.

Localidad	Coef. sis. 1974	a <sub>c</sub> 1994
Granada	0,30	0,24
Murcia	0,30	0,15
Almería	0,06	0,13

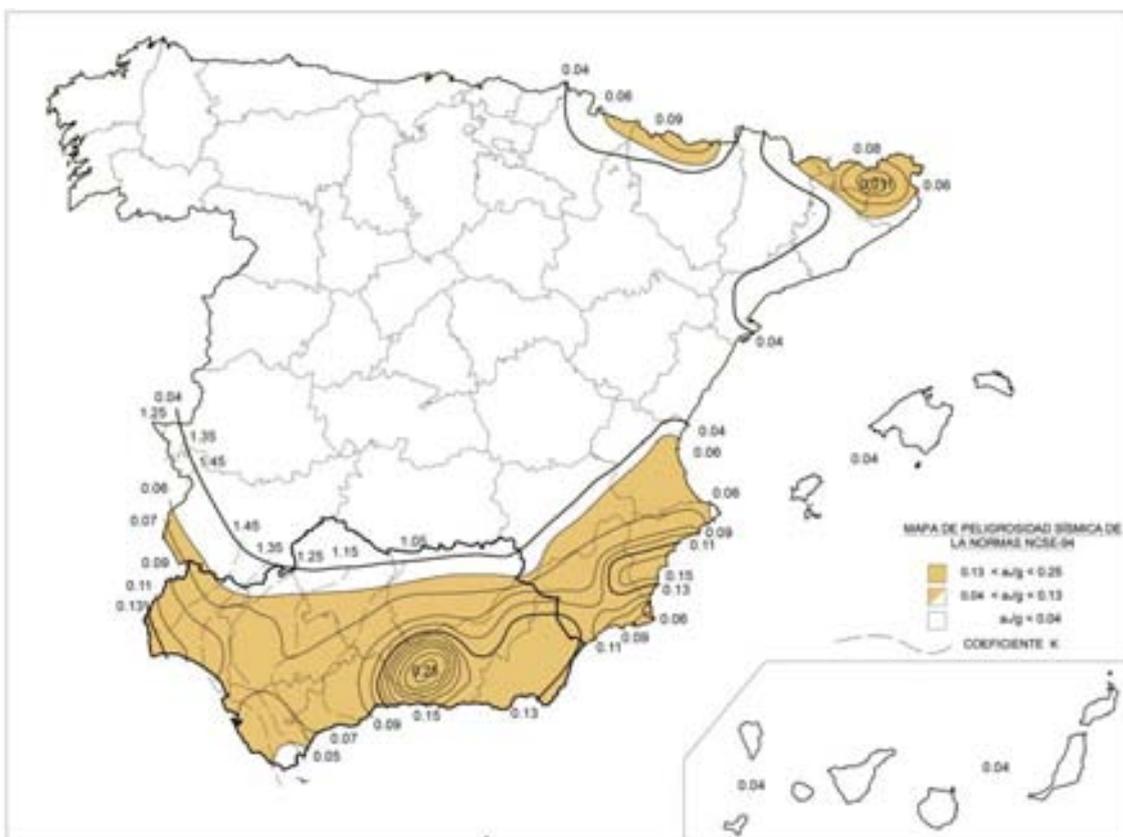


Figura 6.8. Mapa de aplicación de la norma NCSE 94 en suelo firme para edificios de normal importancia.

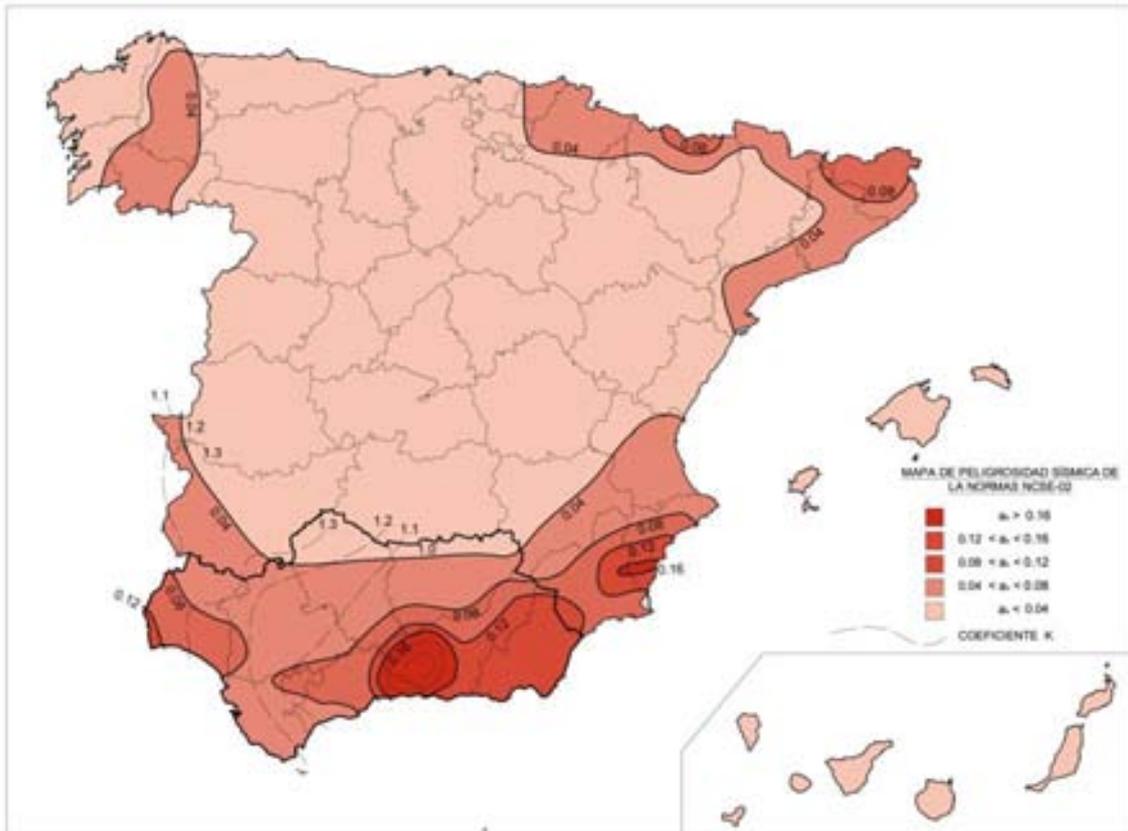


Figura 6.9. Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente NCSE-02

#### COMENTARIO

A efectos de cálculo, la renovación de la NCSE-02 establece como ámbito de aplicación el valor de  $a_b \geq 0,08g$  para estructuras a base de pórticos de hormigón, actualmente dominantes en el panorama constructivo español, y  $a_b \geq 0,04g$  para edificaciones de fábrica. No se pueden dar otro tipo de construcciones ya que la mampostería ordinaria está proscrita en todo el ámbito de aplicación de la norma.

En Lorca, el valor de aceleración básica es de  $0,12g$ .

Además del valor de Lorca, se producen los siguientes cambios a los valores de aceleración básica en las tres ciudades de mayor peligrosidad de España, si bien debe tenerse en cuenta que el mapa del año 2002 se refiere a suelo muy firme, y no roca como los mapas anteriores.

Localidad	Coef. sis. 1974	$a_c$ 1994	$a_c$ 2002
Granada	0,30	0,24	0,23
Murcia	0,30	0,15	0,15
Almería	0,06	0,13	0,14



**Figura 6.10.** Mapa de aplicación de la norma NCSE 02 en suelo firme para edificios de pórticos de normal importancia.

#### 6.1.4. Clasificación de tipologías constructivas en términos de vulnerabilidad

Las tipologías constructivas del área geográfica de Lorca a efectos de su vulnerabilidad a sismo han sido estudiados por Murphy (Proyecto Rismur 2006) y más recientemente en 2010. (Proyecto Sismozon).

Dado que cada edificio es único en su concepción, realización y posterior comportamiento a sismo, conviene agrupar los edificios en tipologías estructurales de acuerdo a las prestaciones sismorresistentes que se pueden esperar de ellos. Para la

edificación tradicional, esto depende de la masa de la edificación y el grado de empotramiento entre distintos elementos de acuerdo a buenas prácticas constructivas. En la edificación tecnológica, consideraremos además la acción sísmica que las distintas normas sismorresistentes hayan exigido de acuerdo a sus periodos de vigencia en el tiempo.

Para Lorca identificamos 6 tipologías constructivas básicas, que en su totalidad describen la práctica totalidad del parque inmobiliario. Identificamos tres tipologías tradicionales de estructura muraria de carga, descrito por el código EM, y tres tipologías tecnológicas de Hormigón Armado descritas por el código EH y ordenadas de acuerdo a las tres renovaciones más importantes de las normas sismorresistentes españolas. Las tipologías se describen a continuación en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1.** 6 tipologías básicas de estructuras en Lorca.

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>EMM</b>	Estructura Muraria de Mampostería Ordinaria + Forjados Madera sin efecto diafragma
<b>EML</b>	Estructura Muraria de fábrica de Ladrillo + Forjados Madera sin efecto diafragma
<b>EMH</b>	Estructura Muraria de fábrica de Ladrillo + Forjados de Hormigón Armado con efecto diafragma
<b>EHP</b>	Estructura de pórticos de Hormigón Armado <1996
<b>EHP94</b>	Estructura de pórticos de Hormigón Armado >1996 <2004 NCSE 94
<b>EHP02</b>	Estructura de pórticos de Hormigón Armado >2004 NCSE 02

Las tipologías consideradas también se pueden ordenar en el tiempo, dado que podemos estimar este dato en la edificación tradicional gracias a los trabajos de campo realizados, y en el caso de la edificación tecnológica sabemos la duración temporal de obligado cumplimiento de cada renovación de la norma.

En el caso de evaluar la vulnerabilidad de las estructuras a sismo, actualmente existe en la literatura científica tres metodologías ampliamente reconocidas y utilizadas mundialmente para estudios de peligrosidad y riesgo. Se trata de las clasificaciones de vulnerabilidad de la escala EMS 98, el Índice de vulnerabilidad del proyecto europeo RISK UE, y los índices de vulnerabilidad del método norteamericano FEMA. Las tipologías de proyecto identificadas en Lorca deben evaluarse de acuerdo a alguna – o

en este caso – todas las metodologías de vulnerabilidad. En la tabla 6.2 se presentan las tipologías constructivas de Lorca ordenadas de acuerdo a los códigos de vulnerabilidad equivalentes usando los tres métodos de vulnerabilidad descritos anteriormente.

**Tabla 6.2.** Asignación de vulnerabilidad de los edificios de Lorca de acuerdo a las metodologías de la escala EMS, Índice de Vulnerabilidad y FEMA.

Tipología	Edad	Nº plantas	EMS	Iv	FEMA	Code
EMM	<1900	1-2	A	0.85 M11L	34 URML	Pre-code
		3-5	A	0.89 M11M	35 URMM	Pre-code
		+6	A	0.93 M11H	35 URMM	Pre-code
EML	1921 - 1940	1-2	B	0.72 M31L	34 URML	Pre-code
		3-5	B	0.76 M31M	35 URMM	Pre-code
		+6	B	0.80 M31H	35 URMH	Pre-code
EMH	1941 - 1964	1-2	C	0.59 M34L	31 RM2L	Pre-code
		3-5	C	0.61 M34M	32 RM2M	Pre-code
		+6	C	0.67 M34H	33 RM2H	Pre-code
EHP	1965 - 1996	1-2	C	0.59 M34L	31 RM2L	Pre-code
		3-5	C	0.60 RC1M	23 C3M	Pre-code
		+6	C	0.68 RC1H	24 C3H	Pre-code
EHP94	1997 - 2004	1-2	D	0.40 RC1L	22 C3L	Low-code
		3-5	D	0.44 RC1M	23 C3M	Low-code
		+6	D	0.48 RC1H	24 C3H	Low-code
EHP02	2005 - 2010	1-2	D	0.40 RC1L	22 C3L	Low-code
		3-5	D	0.44 RC1M	23 C3M	Low-code
		+6	D	0.48 RC1H	24 C3H	Low-code

## 6.2. DAÑOS OBSERVADOS DURANTE EL TERREMOTO

### 6.2.1. Daños observados en la edificación tradicional

Los daños a los edificios de estructura muraria bajo la acción sísmica siguen un patrón reconocido y ampliamente estudiado. Los planos murarios sometidos a esfuerzos de cortante se dañan en fisuras características en forma de aspa o X, mientras fuera de plano las estructuras muraras sufren deriva y pérdida de enlace con los muros de arrostramiento perpendicular.

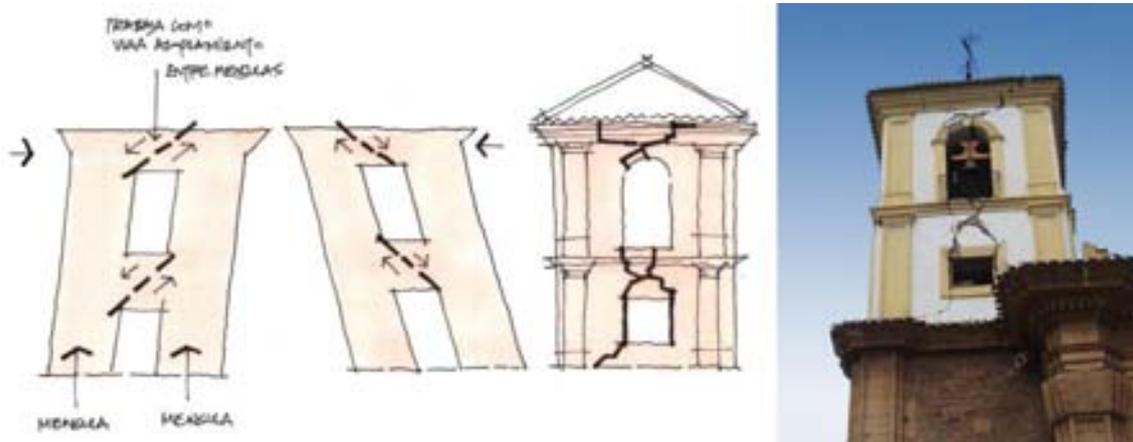


Figura 6.11. Daños por cortante en forma de aspa en la torre de la iglesia de Santiago.



**Figura 6.12.** Daños por cortante en forma de aspa en la torre de la iglesia del paso azul.



**Figura 6.13.** *Deriva de muro de carga en torre medieval de la muralla*



**Figura 6.14.** *Vuelco de estructura muraria de fábrica de ladrillo en la estación de Lorca*



**Figura 6.15.** *Derrumbamiento de la nave de crucero de la iglesia de Santiago.*

## **6.2.2. Daños observados en la edificación tecnológica.**

### **6.2.2.1. Características de la edificación tecnológica**

Explicar los daños observados en los edificios de Lorca obliga a un análisis de las características sismorresistentes de la tipología básica estructural más común, que detallamos a continuación.

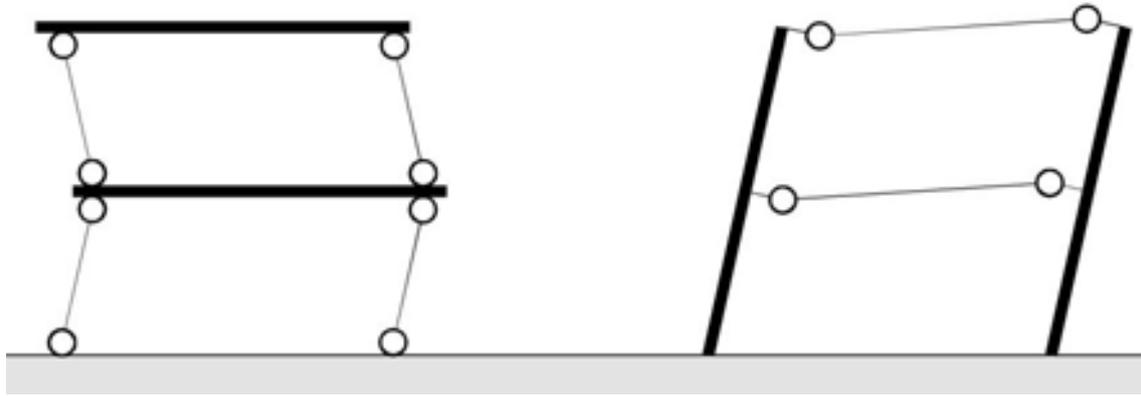
La tipología constructiva que mejor describe la edificación actual de Lorca es el de estructura de pilares y forjados de hormigón armado. Cuando se trata de una finca urbana, es habitual que la planta baja se destine a local comercial o actividad terciaria, y las plantas superiores a vivienda. El forjado habitualmente se resuelve con cara inferior plano, compuesto de viguetas unidireccionales y vigas planas, forjados bidireccionales (reticular) o losa maciza.

Esta solución constructiva está muy arraigada en nuestro territorio por las ventajas, rapidez, economía y sencillez del proceso de encofrado de losas planas y la ausencia de vigas de canto permite maximizar las alturas libres interiores.

Cuando no existe ningún elemento sismorresistente adicional, como sería el caso de una pantalla resistente, los esfuerzos horizontales a sismo se resisten por la rigidez del empotramiento entre pilares y forjado. Llamamos 'nudo rígido' a este estrategia de rigidez estructural.

### **6.2.2.2. Prestaciones sismorresistentes**

La tipología de losa masiva y pilar débil no es una tipología claramente reconocida como sismorresistente y su uso se encuentra limitado en zonas de mayor sismicidad en otros países como es el caso de EEUU. (ASCE-7) Asimismo esta tipología se encuentra ampliamente debatida. Esto se debe a que la combinación de pilar débil y forjado masivo fomenta la formación de mecanismos inestables de planta, resultado contrario al objetivo de las NNSS. La diferencia entre un mecanismo inestable e estable se muestra en figura 6.16.



**Figura 6.16.** Esquema de mecanismo inestable (izquierda) y estable (derecha).

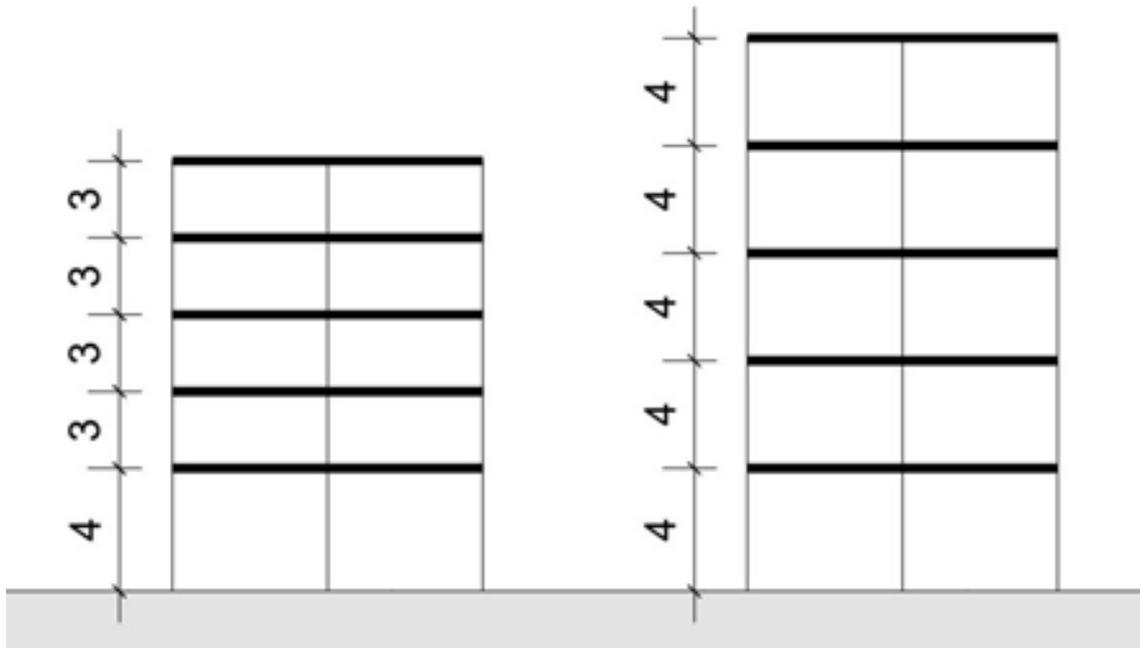
### **Plantas bajas diáfanas**

Se observa un comportamiento generalizado de planta baja diáfana en los edificios tecnológicos urbanos de Lorca. Esto se debe a la confluencia de varios factores que detallaremos a continuación.

### **Irregularidad en altura**

Los edificios con plantas bajas de altura claramente distinta a las superiores poseen una irregularidad de rigidez. Esta situación está penalizada en la ASCE-7 y Eurocódigo 8. En la NCSE02 los edificios irregulares no podrán optar por el método de cálculo sencillo de fuerzas estáticas equivalentes.

El plan general de ordenación urbana de Lorca obliga a los locales de planta baja alturas libres mínimas superiores a los de plantas de viviendas. (3m locales comerciales; 3,2m locales hostelería y 2,5m viviendas) Esta obligación tiene gran relevancia al generalizar por cumplimiento urbanístico el fenómeno de planta baja diáfana. En la figura 6.17 se muestran edificios con irregularidad y regularidad en altura.

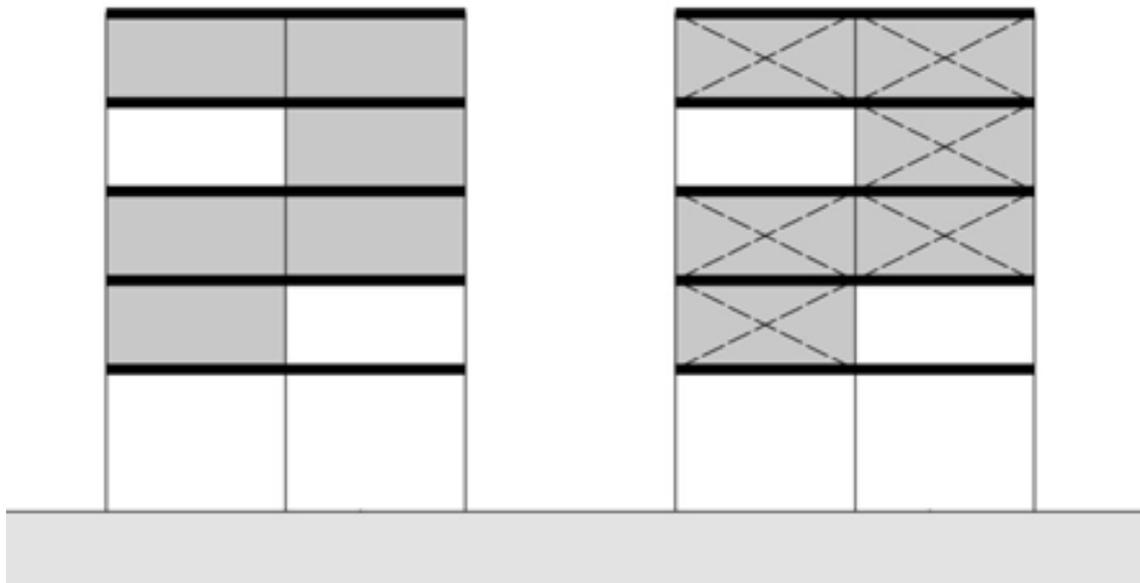


**Figura 6.17.** Edificio irregular (izquierda) y regular (derecha). El edificio de la izquierda posee una planta baja débil por el cambio de rigidez en esa planta relativa a las superiores.

### Participación de elementos no estructurales

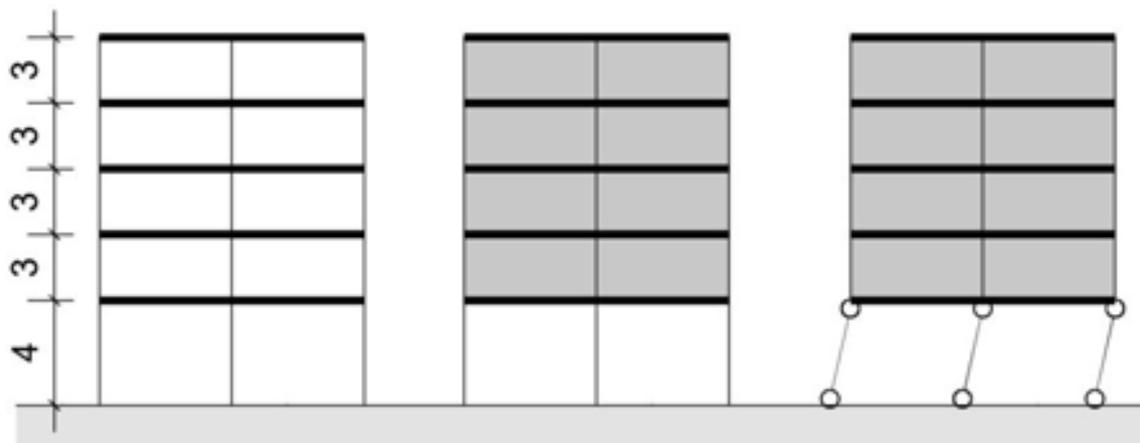
Los cerramientos y particiones de albañilería de los edificios son considerados elementos ‘no estructurales’ pero adquieren un claro carácter estructural durante un sismo. Cuando estos elementos son más rígidos que la estructura principal, la respuesta del sismo viene condicionada por estos elementos.

La rigidización de un pórtico por albañilería se puede asimilar al efecto de una cruz o tirante adicional de rigidización, ilustrado en la figura 6.18. Por este motivo la disposición irregular de cerramientos y particiones de albañilería se consideran en el ASCE 7 y EC8 una irregularidad estructural en altura.



**Figura 6.18.** Los muros no estructurales de albañilería participan en la rigidización del conjunto al no permitir la deformación de la estructura. Cuando los paños de albañilería son irregulares en su disposición en las plantas, se produce una irregularidad de rigidez en altura. La participación de los lienzos de cerramiento se puede modelizar como un tirante rigidizando el pórtico correspondiente.

En ocasiones operan simultáneamente ambas casuísticas de generación de una planta baja diáfana, al concurrir una planta baja esbelta con irregularidades de compartimentación de albañilería, ilustrado en la figura 6.19.



**Figura 6.19.** Una planta esbelta e irregularidad de compartimentación de albañilería actuando conjuntamente para producir una planta baja diáfana inestable.

A continuación presentamos unas fotografías de edificios dañados donde observaremos la aplicación de los conceptos descritos anteriormente.



**Figura 6.20.** Daños a cerramientos de plantas bajas en un edificio de vivienda con locales comerciales de gran esbeltez (izquierda) y en el hospital Rafael Méndez. (derecha).



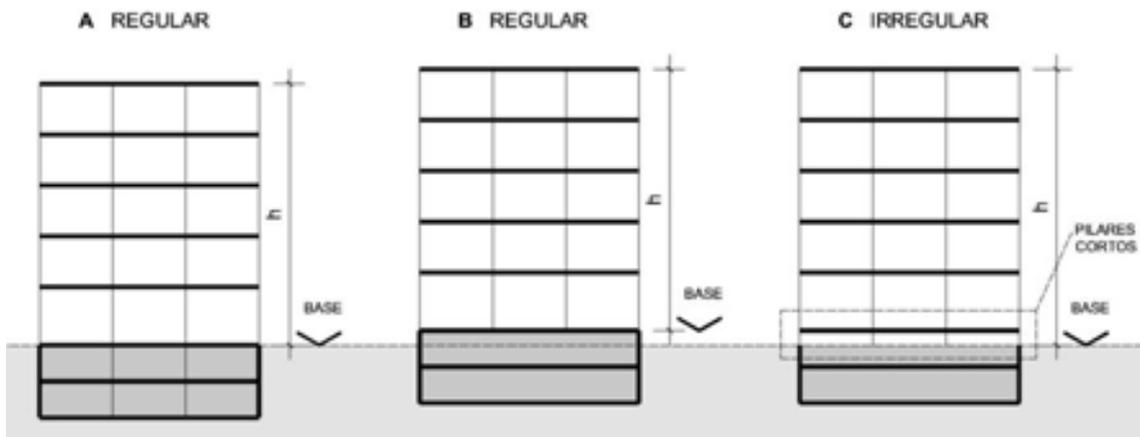
**Figura 6.21.** Daños por cortante en el cerramiento no estructural de planta baja de un edificio de viviendas. El cerramiento ha entrado en carga resistiendo los esfuerzos horizontales de la estructura, por lo que muestra los mismos mecanismos de daño que las estructuras murarias, fallando por cortante con grietas en forma de aspa.



**Figura 6.22.** *Daño frágil por cortante en cabezas de pilares de plantas bajas observados en varios edificios. Esto es un mecanismo inestable de daño de gran peligrosidad.*

### **Pilares cortos**

Las fuerzas sísmicas se consideran que actúan de manera dinámica sobre el cuerpo libre u oscilante del edificio, considerándose la base del edificio el plano de rasante del terreno del que emerge la estructura. Normalmente esto coincide con el nivel de planta baja cuando ésta se encuentra a nivel de la rasante del terreno. En los casos donde la planta baja se eleve respecto al terreno, se puede seguir considerando como la base oscilante cuando se encuentre perfectamente rigidizado, por ejemplo cuando los muros del sótano afloran en superficie hasta el forjado de planta baja. Cuando la planta baja se eleve sobre pilares cortos, el edificio adquiere un caso de irregularidad de rigidez en altura.



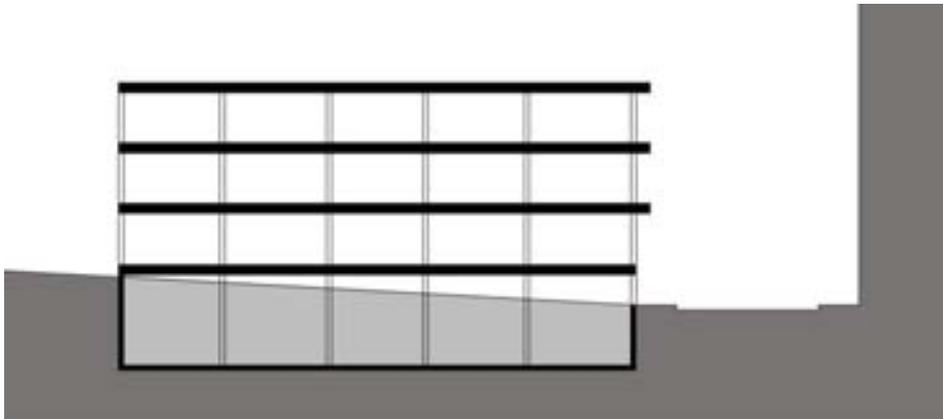
**Figura 6.23.** Formación de pilares cortos y su relación con la base oscilante del edificio.



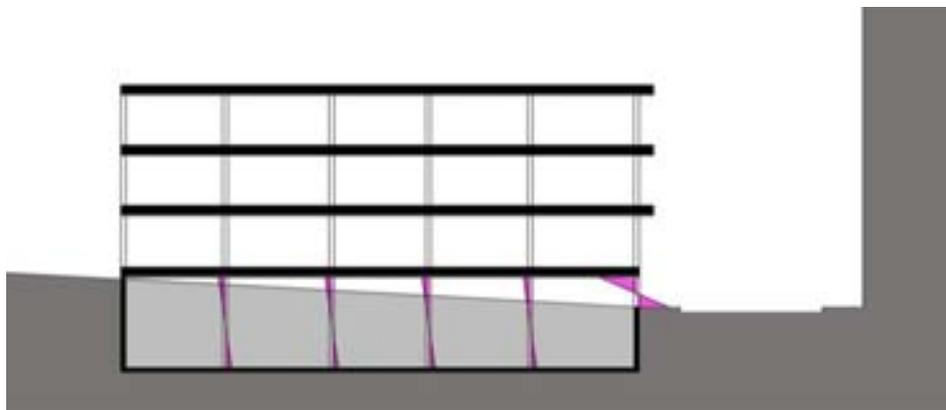
**Figura 6.24.** Dos tipos de pilares cortos dañados en edificios de Lorca.

En la Calle Infante Juan Manuel nº 5 colapsó completamente un edificio de pórticos de Hormigón Armado de tres alturas. El edificio poseía una planta baja elevada con respecto de la rasante de la calle y pilares cortos en dos pórticos perimetrales. Un

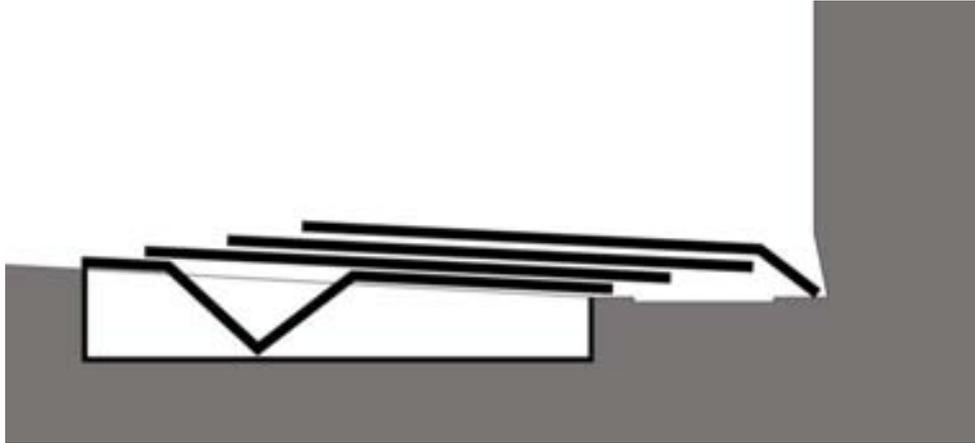
edificio gemelo colindante de la misma promoción (fig 6.24, izquierda) acusa graves deformaciones en los pilares cortos confirmando el mecanismo de colapso causado por el fallo de los pilares cortos perimetrales. (Figuras 6.25 – 6.28).



**Figura 6.25.** Edificio de tres plantas en la calle Infante Juan Manuel con pilares cortos en los pórticos perimetrales.



**Figura 6.26.** Bajo la acción del sismo, los pilares cortos del pórtico perimetral atraen gran parte de la carga sísmica debido a su gran rigidez con respecto al resto de pilares de su planta.



**Figura 6.27.** El fallo de los pilares cortos provoca el basculamiento y colapso del inmueble que invade la calle Talleres impactando y dañando el edificio de enfrente.



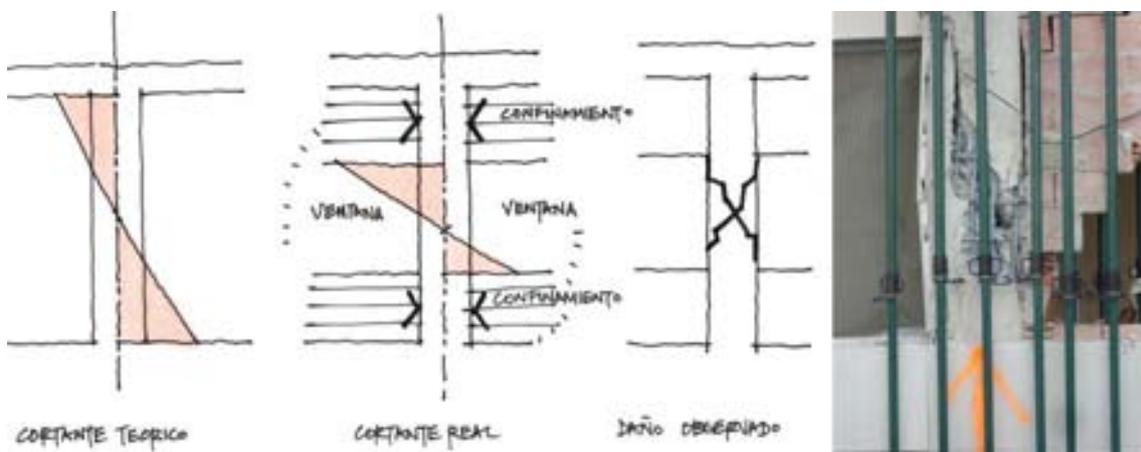
**Figura 6.28.** El edificio colapsado en la Calle Infante Juan Manuel.



**Figura 6.29.** Detalle del encuentro pilar-forjado del edificio colapsado. Ver figura 6.16 para comprensión de un mecanismo inestable.

### Pilares secuestrados

Se observa en muchos edificios daños a la estructura de hormigón armado por la interacción con elementos no estructurales rigidizantes. Un caso típico y muy extendido son dos ventanas a ambos lados de un pilar, como ilustramos en la figura 6.30.



**Figura 6.30.** Pilar secuestrado por el confinamiento de albañilería de un edificio de Lorca.

## Embestimiento

La norma NCSE02 obliga a los edificios colindantes a retranquearse unos de otros una distancia equivalente al desplazamiento máximo calculado del edificio para evitar el embestimiento entre ellos, si bien las normas antiguas no exigían este retranqueo. La norma actual tiene el inconveniente además, de no limitar el desplazamiento máximo sea el edificio colindante o no. Si consideramos que la definición de la planta de un edificio se produce durante el proyecto básico, momento en el que se declara la ocupación en planta y el aprovechamiento urbanístico, y esta es una fase en la que no se suele realizar cálculos estructurales, concluimos que esta es una prescripción difícil de cumplir con posterioridad. El retranqueo del edificio además, supone renunciar a un porcentaje del aprovechamiento urbanístico, por lo que es una prescripción desfavorable para inversores y promotores. En Lorca se observan muchos daños por el embestimiento de edificios colindantes.



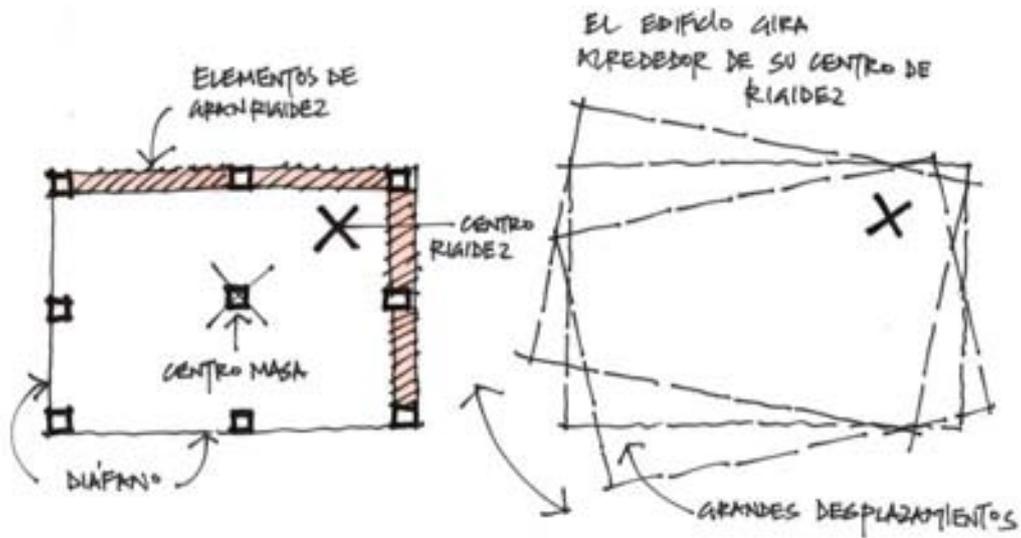
**Figura 6.31.** Los daños concentrados en la tercera planta de este edificio vienen motivados por el confinamiento del edificio colindante más bajo y rígido de la derecha. En edificios altos, el desplazamiento observado ha sido muy grande, indicado por los daños de impacto causados entre los edificios de la imagen de la derecha.



**Figura 6.32.** *Daños por embestimiento en edificios de altura en Lorca.*

### **Torsión**

La disposición irregular de los elementos de rigidez provoca una rotación del edificio sobre su eje vertical conocido como torsión. Los edificios en esquina son muy sensibles a este fenómeno dado que sus medianeras se hallan rigidizadas por albañilería en toda su altura, a diferencia de los alzados exteriores de esquina.



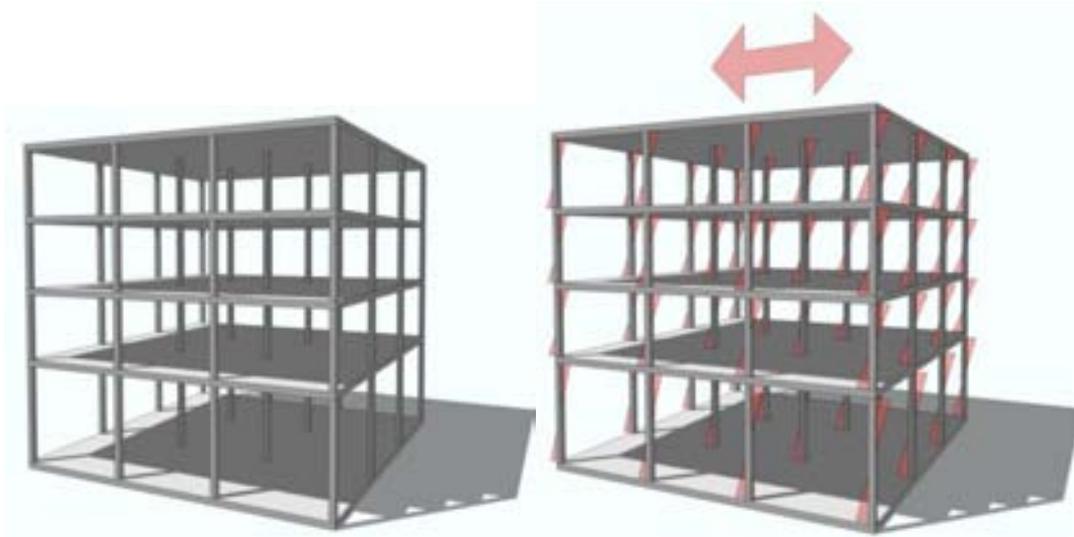
**Figura 6.33.** Torsión motivada por el efecto rigidizante de los muros medianeros de un edificio de esquina.



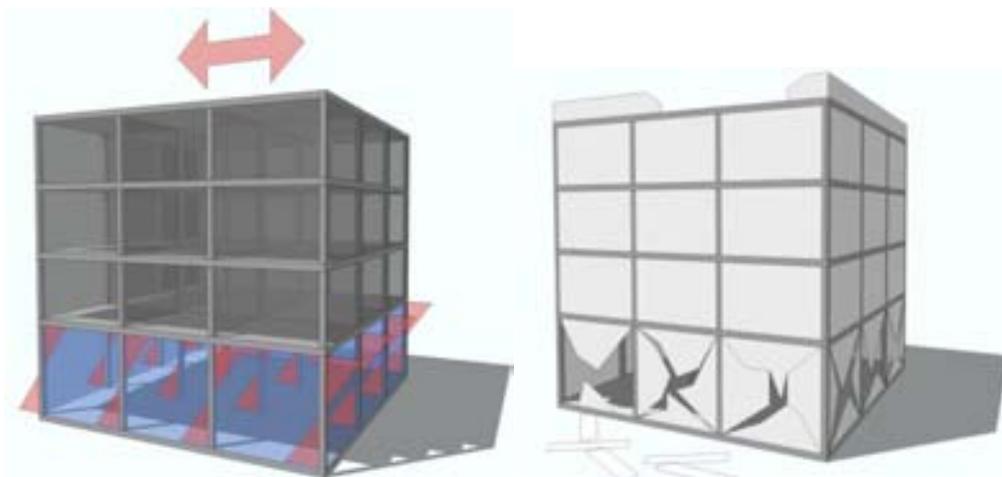
**Figura 6.34.** Torsión motivada por el efecto rigidizante de los muros medianeros de un edificio de esquina con grandes deformaciones permanentes en el pilar de la esquina más alejada del centro de rotación. Este edificio se derrumbó a los pocos días de realizar las fotografías.

### Modelización de tipos de edificio y daños.

El tipo de edificio y los daños observados se pueden resumir en una secuencia de modelizaciones ilustradas en las siguientes figuras.



**Figura 6.35.** La teoría: Edificio de planta baja comercial y vivienda en altura característica de nuestro entorno urbano actual. Bajo la acción del sismo imaginamos que las fuerzas se distribuyen por toda la estructura.



**Figura 6.36.** La realidad. Cuando consideramos la acción rigidizante de la albañilería en las plantas superiores y la planta baja diáfana, la deformación es distinta, obligando la planta baja a grandes desplazamientos.

### 6.2.2.2. Elementos no estructurales

#### Cerramientos

Los cerramientos de albañilería se consideran elementos no estructurales pero indudablemente desarrollan rigidez y entran en carga durante un sismo al intentar

deformarse la estructura. Los fallos por cortante en forma de aspa o cruz evidencia este proceso.



**Figura 6.37.** Grietas por cortante en forma de aspa en el cerramiento de un edificio público de muy reciente construcción en Lorca. A la derecha aspas de cortante en el hospital Rafael Méndez.



**Figura 6.38.** Fallo de cerramientos no estructurales bloqueando las salidas de edificios o locales.

### **Parapetos y antepechos**

El desprendimiento de elementos no estructurales fue la principal causa de mortalidad durante el terremoto de Lorca. Antepechos y parapetos de fábrica de ladrillo en las coronaciones de los edificios fueron lanzados a la vía pública destrozando automóviles y matando a transeúntes.

La actual norma obliga a confinar los antepechos con enzunchados de hormigón a partir de una peligrosidad de 0.12g. Es decir, desde el año 2004 todos los edificios de Lorca deberían haber cumplido con este requisito. En la norma anterior, con un periodo de vigencia entre 1996 y 2004, este requisito sólo era obligatorio en zonas con peligrosidad superior a 0,16g. Es de suponer que son los edificios construidos con anterioridad a 2004 los principales causantes del daño.



**Figura 6.39.** *Caída de antepecho de bloque sin armar en un edificio dotacional de Lorca.*



**Figura 6.40.** La Calle Galicia de Lorca donde varios vecinos perecieron debido a la caída de los parapetos de cubierta. Las calles estrechas con edificios altos presentan gran vulnerabilidad.

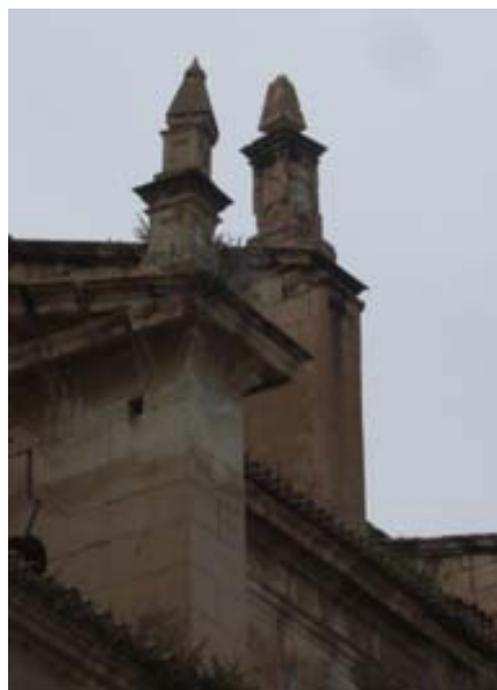


**Figura 6.41.** Un automóvil dañado por la caída de parapetos de cubierta en la Calle Galicia.

## Otros efectos



**Figura 6.42.** Torres de iglesia nuevas y viejas dañadas por el terremoto



**Figura 6.43.** Rotación y giro del obelisco de la Carrera y giro de pináculos de la colegiata de San Patricio.



**Figura 6.44.** *Daños a productos en supermercados y tiendas de Lorca.*

### **6.3. ESTADÍSTICAS DE DAÑOS A EDIFICIOS**

#### **Triage técnico de edificios**

Desde el mismo instante del terremoto, un equipo de arquitectos y arquitectos técnicos voluntarios se encargaron del triage, o evaluación de emergencia del parque inmobiliario de Lorca, tarea en la que participó el autor. El objeto del triage corresponde al de una primera evaluación básica de seguridad y habitabilidad de los edificios, por lo que los datos deberán tomarse como orientativos. Un total de 7839 edificios se habían analizado por los arquitectos al finalizar la primera semana del sismo. Estos datos han sido incorporados a la planimetría municipal para disponer de datos de daños georreferenciados.

Los edificios se evaluaron de acuerdo a las etiquetas verde; amarillo y rojo. La clasificación de verde significa seguridad de utilización, si bien el edificio puede ostentar daños ligeros como fisuras, grietas o pequeños desprendimientos. La clasificación amarilla significa edificio con daños y el acceso al mismo está condicionado a la eliminación del riesgo, - por ejemplo el derribo de techos o

parapetos dañados – o bien se permite su utilización con precaución. Estos edificios pueden o no tener además daños estructurales. La etiqueta roja significa edificio dañado estructuralmente y es necesario prohibir el acceso al inmueble. La mayoría de las etiquetas rojas emitidas se refieren a edificios con daños a los pilares similares a la indicada en la figura 6.21. Debe recalcar que sólo se han identificado los edificios con daños amarillo o rojo, siendo los demás de calificación verde, si bien estos pueden presentar daños ligeros, por lo que este estudio no es capaz de identificar aquellos edificios con daños ligeros o muy ligeros. El mapa de daños se presenta en las figuras 6.45. y 6.46.

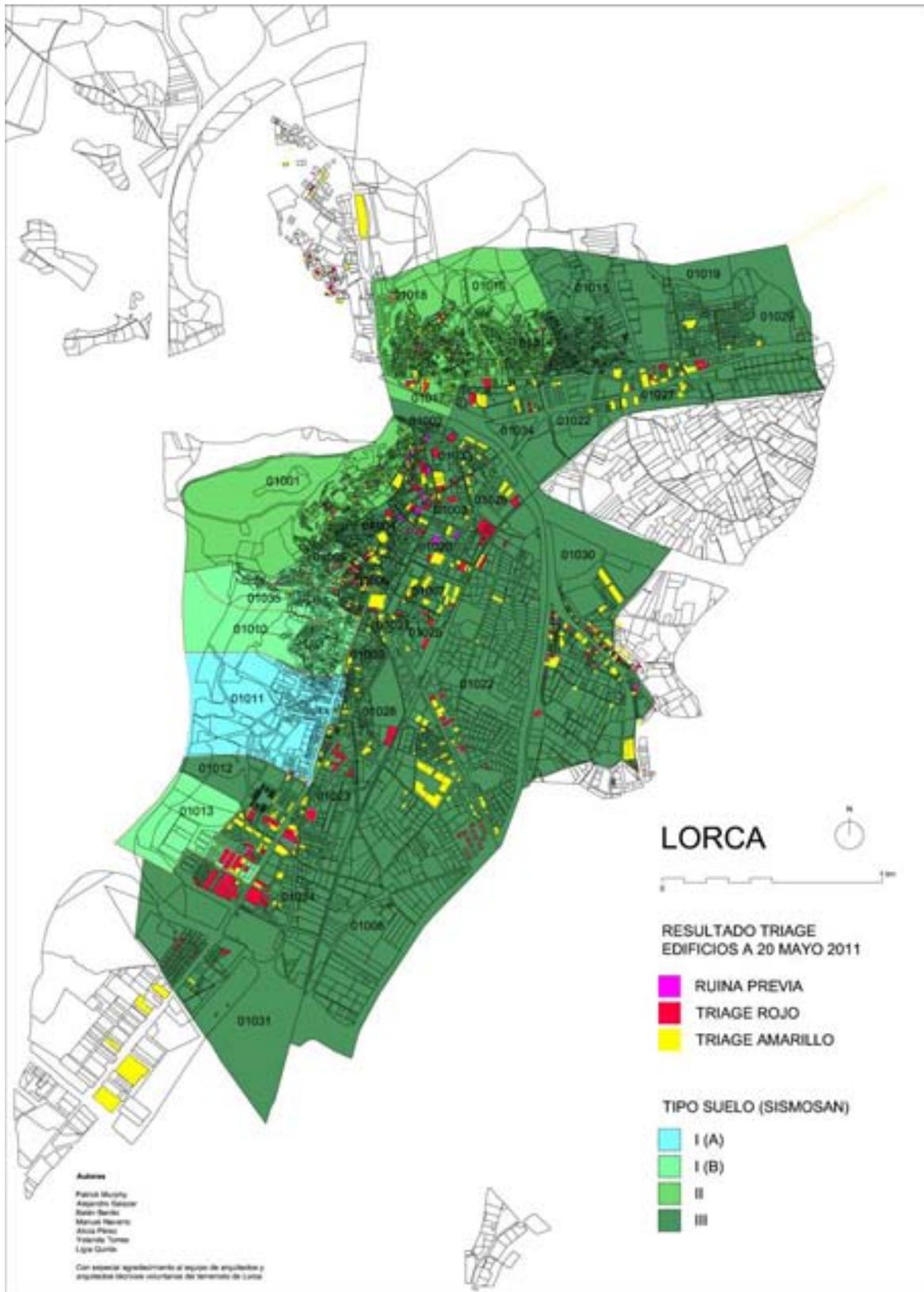
### **Datos de daños**

En el área municipal analizado con un total de 5155 edificios, 889 de ellos o el 13% del total han obtenido la calificación de daño amarillo o rojo. Es llamativa la incidencia de daños en algunos distritos censales del barrio de la Viña como son los números 1013; y 1024 con porcentajes de edificios dañados del 41% y 40% sobre el total de edificios de su distrito.

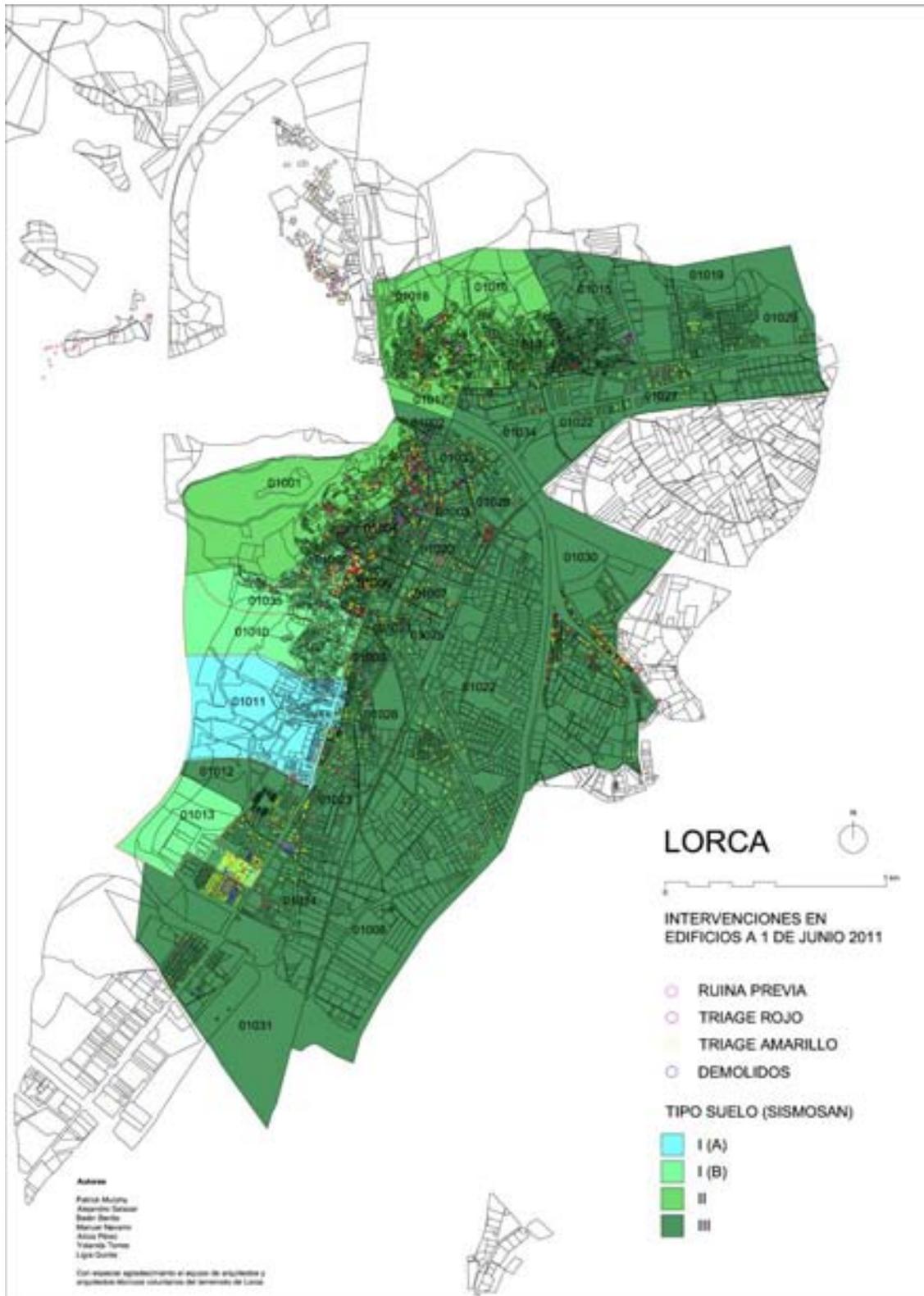
El distrito censal 1004, representativo del casco histórico sufre daños amarillos o rojos a un 16% del total de edificios de su distrito.

Al igual que en el Barrio de la Viña. El barrio de la avenida de las fuerzas armadas representado por el distrito 1027 tiene daños al 40% del total de edificios. Los datos pormenorizados por distrito censal se presentan en la tabla 6.3.

El mapa de daños se ha superpuesto sobre las características de suelo del municipio de Lorca realizado en el proyecto Sismozon donde se caracterizan 4 tipo de suelos de firme a blando denominados IA; IB II y III. Un análisis de la incidencia de daños sobre el total de edificios por cada tipo de suelo muestra un claro aumento de daños en el suelo tipo III, correspondiendo a los depósitos sedimentarios del Guadalentín, como indicamos en la tabla 6.4.



**Figura 6.45.** Daños en Lorca indicando edificios declarados amarillo (daños moderados) y rojo (daños graves) por distrito censal y tipo de suelo con datos del 20 de mayo. Se indican también aquellos edificios que ya se hallaban en ruina antes del sismo. El parque inmobiliario del área censal estudiado en este trabajo es de 5155 edificios.



**Figura 6.46.** Daños en Lorca indicando edificios declarados amarillo (daños moderados) y rojo (daños graves) por distrito censal y tipo de suelo con datos del 1 de junio. Se indican las demoliciones (19 edificios) realizados con posterioridad al sismo.

**Tabla 6.3. Daños a edificios de Lorca por distrito censal.**

distrito censal	Triage		Edificios Demolidos	Total Dañados	Tipo Suelo	Nº Edif. Tradicionales	Nº Edif. Tecnológicos	Total Edificios	% daños sobre total
	Amarillo	Rojo							
1001	28	26	1	55	II	527	57	584	9,4%
1002	33	29		62	III	164	56	220	28,2%
1003	9	6	1	16	III	25	37	62	25,8%
1004	21	19		40	III	201	48	249	16,1%
1005	22	29		51	IB	304	48	352	14,5%
1006	38	21		59	III	161	83	244	24,2%
1007	14	5		19	III	17	28	45	42,2%
1008	28	10		38	III	93	43	136	27,9%
1009	12	3		15	III	67	76	143	10,5%
1010	2	3	1	6	IB	333	57	390	1,5%
1011	13	10	1	24	IA	228	141	369	6,5%
1012	35	9	1	45	III	177	31	208	21,6%
1013	14	3	2	19	IB y III	21	25	46	41,3%
1014	0	1		1	II	318	26	344	0,3%
1015	1	7		8	III	376	34	410	2,0%
1016	5	3		8	II	315	46	361	2,2%
1017	21	6		27	II	275	50	325	8,3%
1018	21	14	1	36	II	365	34	399	9,0%
1019	8	0		8	III	19	56	75	10,7%
1020	10	1		11	III	25	26	51	21,6%
1021	8			8	III	6	26	32	25,0%
1022	18	5		23	III	129	73	202	11,4%
1023	14	13		27	III	45	71	116	23,3%
1024	22	8	3	33	III	31	50	81	40,7%
1025	3	5		8	III	14	24	38	21,1%
1026	7	6		13	III	25	32	57	22,8%
1027	17	11		28	III	20	50	70	40,0%
1028	4	4		8	III	38	23	61	13,1%
1029	5	5		10	III	28	23	51	19,6%
1030	70	32	1	103	III	277	57	334	30,8%
1031	14	7	1	22	III	177	38	215	10,2%
1032	4	2		6	III	42	32	74	8,1%
1033	12	10		22	III	44	27	71	31,0%
1034	9	4		13	III	50	33	83	15,7%
1035	8	9		17	IB	218	46	264	6,4%
<b>Total</b>	<b>550</b>	<b>326</b>	<b>13</b>	<b>889</b>		<b>5155</b>	<b>1607</b>	<b>6762</b>	<b>13,1%</b>

**Tabla 6.4.** *Daños a los edificios de Lorca por tipo de suelo*

<b>Tipo Suelo</b>	<b>Total Edificios</b>	<b>Total Dañados</b>	<b>% daños sobre total</b>
IA	369	24	6,50%
IB	1006	74	7,36%
II	2013	127	6,31%
III	3374	664	19,68%

## 7. CONCLUSIONES

### SISMICIDAD

Los estudios de sismicidad requieren que la información básica, como son los catálogos sísmicos, sean lo mas completos y homogéneos posible, tanto en el tiempo y el espacio como en los parámetros de tamaño de los terremotos. Para disponer de esta calidad en los datos se requieren estudios específicos de la sismicidad. Por un lado se debe investigar el periodo histórico, donde tal y como se ha visto en el presente informe, los terremotos ocurridos desde el siglo XV hasta el XX marcan un nivel de actividad sísmica en Lorca que es necesario tener en cuenta. La diversidad de archivos, tanto a nivel local como provincial o estatal, con posible información respecto a daños por terremotos, deben ser expurgados por especialistas archivísticos que transfieran los datos para su evaluación posterior por sismólogos. De igual forma, la parte instrumental del catalogo sísmico requiere una revisión de terremotos registrados para desde el inicio del siglo XX usando metodologías adecuadas al conocimiento actual.

La determinación hipocentral de los terremotos está basada en los tiempos de propagación de las diferentes fases que componen las ondas sísmicas, siendo estos obtenidos mediante cálculos teóricos a partir de una determinada estructura de la corteza. Por consiguiente, con objeto de minimizar las incertidumbres en las determinaciones de las coordenadas epicentrales y la profundidad de los focos sísmicos, se estima necesario continuar realizando los proyectos que estén involucrados para el conocimiento de la estructura cortical.

La sucesiva mejora que se realizó en la instrumentación en la región de Murcia con motivo de los terremotos de 1999, 2002 y 2005 ha permitido que el reciente sismo de Lorca haya tenido una muy buena calidad y cantidad de datos, por lo que se debe continuar con la mejora de la instrumentación en otras partes de España en las que la sismicidad tenga también un nivel importante de actividad.

## PELIGROSIDAD SÍSMICA

La peligrosidad sísmica en Lorca se puede calificar de alta, en el contexto de la Península Ibérica, si bien es moderada en un contexto mundial. Dicha peligrosidad se explica por la localización de la población en la traza del sistema de fallas activas de Alhama de Murcia, con ocurrencia de terremotos significativos en el pasado. Además, se han propuesto procesos de disparo entre series sísmicas relativamente cercanas en el espacio (Benito et al. 2007) que parecen confirmarse también por la proximidad temporal de dichas series (Mula, 1999; Bullas, 2002, La Paca, 2005 y Lorca, 2011). Este hecho, unido al daño observado por terremotos de baja-moderada magnitud, confiere un riesgo sísmico relevante a la población.

Los diversos estudios de peligrosidad desarrollados hasta la fecha proporcionan resultados de aceleración esperada en roca para la probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años, empleada en el diseño de viviendas convencionales, en un rango de variación entre 0.12 g y 0.24 g (Buforn et al. 2005; García-Mayordomo, 2005; Benito et al., 2006; García-Mayordomo et al. 2007; García Blanco 2009; Crespo 2011), estando los de la norma Española NCSE-02 en el límite inferior. Ninguno de estos estudios ha considerado las fallas como unidades independientes (con peso relevante) en el cálculo de la peligrosidad; hecho que se traduce en la reducción de la misma en la proximidad de las fallas, diluyéndose en zonas más amplias.

Los terremotos de control, que dominan la peligrosidad para la probabilidad de excedencia asumida (10 % en 50 años) corresponden a eventos de magnitud baja-moderada Mw (4.5-5) con distancias fuente-emplazamiento cortas (0-10 km) (Gaspar-Escribano et al. 2008), es decir, similares a los del 11 de mayo de 2011. De este modo se constata que el patrón de sismicidad observado en la zona, compuesto por sismos frecuentes de magnitud en torno a 5.0, constituye la mayor contribución a la peligrosidad para la probabilidad que se considera oficialmente en el diseño sismorresistente de viviendas convencionales.

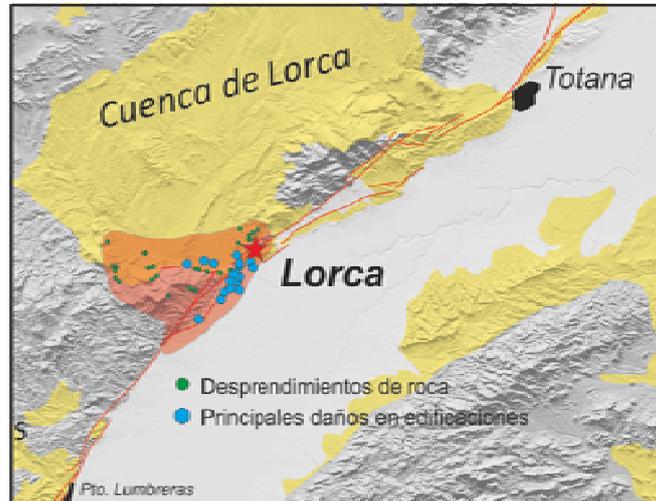
Asimismo, diferentes espectros de respuesta estimados en estudios recientes, incluidos los asociados a los citados sismos de control, superan a los correspondientes espectros de la norma NCSE-02 en el rango de los cortos periodos, siendo sin embargo superados por ésta para los periodos largos. Todos están muy por debajo del registrado en la estación de Lorca en el sismo del 11 de mayo de 2011, lo que podría contribuir a explicar el daño causado especialmente en viviendas de entre 3 y 5 plantas, con periodo fundamental de vibración en el rango de los cortos periodos.

Como recomendaciones, las lecciones aprendidas en el terremoto de Lorca de 2011 y en los anteriores de 1999, 2002 y 2005 deberían ser tenidas en cuenta en la revisión de la normativa, destacando especialmente:

- Necesidad de modelizar las fallas activas e incluirlas como unidades independientes en el cálculo de la peligrosidad, a fin de obtener aceleraciones más realistas en la proximidad de dichas fallas.
- Necesidad de ajustar las formas espectrales de la normativa con las deducidas de los registros reales.
- Necesidad de determinar posibles efectos de resonancia entre el comportamiento dinámico del suelo y el de las estructuras.

## GEOLOGÍA

-La serie sísmica de Lorca fue producida por el movimiento de un pequeño tramo de la Falla de Alhama de Murcia. Esta afirmación está sustentada por la localización de los dos terremotos principales, los mecanismos focales resultantes, la distribución de los daños en las edificaciones y los efectos geológicos observados el terreno.



**Figura 7.1.** Mapa esquemático en el que se resumen la distribución de los daños y efectos geológicos generados por el terremoto de Lorca. La estrella marca el epicentro.

-La sacudida sísmica se propagó desde el epicentro hacia la ciudad de Lorca, tal y como señalan la polaridad de los daños y los efectos geológicos identificados en campo.

-La asociación de los terremotos de Lorca a la Falla de Alhama de Murcia podría implicar la ocurrencia de nuevos terremotos asociados con otros tramos de la falla. El estudio del cambio de esfuerzos local producido por el terremoto de Lorca en relación con los segmentos Goñar-Lorca y Lorca-Totana de la misma falla debe ser analizado

con prontitud.

-Se tiene constancia histórica de que la ocurrencia de series sísmicas en la zona de Lorca suele estar compuesta por varios terremotos separados un tiempo determinado. Este hecho está posiblemente relacionado con la interacción dinámica entre segmentos tectónicos de la misma falla, como se ha comentado en el párrafo anterior. Este proceso debe ser constatado mediante la obtención de datos más antiguos a través de las técnicas geológicas adecuadas (paleosismología) y en todo caso no debe desecharse la posibilidad de otro terremoto de similares características en entorno próximo.

-Los elevados daños generados por un terremoto de magnitud moderada como este pero muy próximo a una zona poblada apoya la necesidad de considerar la posición, geometría y parámetros geológicos de las fallas en los estudios de peligrosidad sísmica dirigidos a mejorar las normas que regulan la gestión del riesgo sísmico.

-Los efectos geológicos superficiales indican hasta la fecha que el terremoto alcanzó una intensidad de efectos geológicos y ambientales (ESI-07) de VII. Es muy importante sin embargo profundizar en la identificación y cartografía de estos efectos tanto a través de reconocimientos detallados de campo, como del análisis de imágenes de satélite de alta resolución posteriores al evento para ajustar esta catalogación y con el fin de obtener datos que nos ayudaran a entender los efectos de terremotos ocurridos en el pasado y los que ocurran en el futuro próximo.

- La experiencia de este terremoto y la práctica común en la mayoría de países sometidos al riesgo sísmico indica que debería establecerse un protocolo de actuación oficial que incorpore la realización de un Informe Geológico sobre los terremotos de magnitud superior a 5 que se produzcan en España y en zonas próximas de la Península Ibérica. Dicho informe debería incluir un reconocimiento geológico de la zona epicentral, determinada con datos del IGN, un reconocimiento de la fuente sísmica si se ha identificado y la catalogación e inventariado de los efectos geológicos asociados (deslizamientos, caídas de rocas, licuefacciones, etc). La elaboración de dicho informe comenzaría a las pocas horas de confirmarse el evento, su localización y su magnitud (datos IGN) y se llevaría a cabo por una comisión de expertos reconocidos de instituciones públicas.

- Los daños en el patrimonio histórico y cultural en terremotos relativamente moderados, que se dan con cierta frecuencia en España, hacen aconsejable acometer un plan especial de estudio y protección de monumentos histórico-artísticos susceptibles de ser dañados por terremotos.

## **NORMATIVA SISMORRESISTENTE**

Es la primera vez en varias décadas que un extenso parque inmobiliario de una ciudad española se somete a un movimiento de suelo fuerte. Dada la variada edad de la edificación en Lorca, se puede observar el comportamiento de edificios realizados bajo las normas del 62, 68, 74, 94 y 2002, todas ellas de aplicación y obligado cumplimiento en Lorca.

Dado que no poseemos legislación que obligue al *retrofitting* estructural, la puesta en día o actualización de las prestaciones sismorresistentes de un edificio, es de esperar una respuesta variado de los edificios. Todos los estudios de vulnerabilidad y riesgo apuntan a la prevalencia de daños y edificios antiguos y mayor seguridad en edificios jóvenes.

Sin embargo en Lorca no se observa una reducción de la vulnerabilidad con los edificios tecnológicos. En algunos distritos censales como el 1027, la mayoría de edificios dañados son tecnológicos de reciente edificación.

Esto puede deberse a la propia expansión urbana cuyos ensanches modernos abandonan el suelo duro de la orografía más alta para ocupar los suelos blandos del valle del Guadalentín, donde el movimiento es amplificado. Sin embargo la norma obliga a considerar el suelo en el cálculo sísmico por lo que estos edificios deberían poseer mayores prestaciones sismorresistentes.

La tipología constructiva de los edificios tecnológicos actuales en Lorca es un problema desde el punto de vista sismorresistente.

Sólo aproximadamente un 34% del territorio peninsular posee una peligrosidad sísmica superior al 0,04g, valor umbral para la aplicación de la norma. Sin embargo los edificios de 'pórticos de hormigón armado bien arriostrados entre sí' hasta 6 plantas de altura no tienen la obligación de aplicar la norma hasta un valor de peligrosidad de 0,08g. Dado que la inmensa proporción de construcciones que se realizan actualmente son inferiores a 8 plantas y el hormigón armado es la tipología constructiva dominante en nuestro territorio, se puede considerar que la norma empieza a aplicarse realmente a partir de 0,08g que representa sólo el 12% del territorio peninsular.

Este dato puede ayudarnos a comprender la contaminación en zonas sísmicas de tipologías estructurales de concepción estática que no son adecuadas para resistir esfuerzos horizontales.

Este es el caso de la tipología de losa, viga plana, losa unidireccional o bidireccional

sobre pilares, donde se confía la rigidez al sismo únicamente por el empotramiento entre estos elementos. La práctica totalidad de los edificios de hormigón armado construido actualmente son de este tipo. Este esquema estructural tiene un mecanismo inestable de fallo y su uso en zonas sísmicas de otros países está limitado, aparte de ser una tipología ampliamente cuestionada en foros de ingeniería sísmica internacionales.

Estas tipologías poseen una escasa rigidez y por ello presentan importantes desplazamientos bajo la acción sísmica. Una de las omisiones de nuestra norma NCSE-02 es *no limitar en valores absolutos (cm) el desplazamiento máximo de un edificio*. En las normas internacionales de referencia consultadas, (EC8 y ASCE7) el desplazamiento máximo es uno de los principales limitadores de diseño y la verificación de la seguridad estructural de un proyecto.

España posee una cultura constructiva basada en la albañilería y la mayor parte de los elementos no estructurales de nuestros edificios como cerramientos o particiones se componen de estos materiales. Dado que no vamos a cambiar esta tendencia – tampoco hay porque hacerlo – se trata de divulgar las tipologías constructivas que sean compatibles con ella.

El EC8 y la literatura actual sobre sismorresistencia recomienda –por no obligar- que los edificios con particiones y cerramientos de albañilería se rigidicen con pantallas de hormigón armado. El motivo es dotar a la estructura de una rigidez superior a la de los elementos no estructurales, permitiendo entrar en carga la estructura sin verse secuestrado por estos elementos. Cuando no es así, nuestras estructuras están sometidas a los caprichos rigidizantes de los elementos no estructurales.

El uso de pantallas rigidizantes no es habitual en nuestros edificios sencillamente porque no hemos desarrollado una cultura constructiva sismorresistente. El uso de pantallas permite seguir usando cerramientos de albañilería y forjados planos porque libera a estos elementos de la necesidad de resistir esfuerzos horizontales. Por eso es una tipología a potenciar y divulgar en nuestro territorio.

La proliferación de graves irregularidades prosísmicas como plantas bajas diáfanos o pilares cortos debe interpretarse como el resultado de displicencia profesional o ignorancia frente a las acciones sísmicas en las edificaciones. También pone de manifiesto el escaso labor pedagógico de la norma sismorresistente y el poco interés o divulgación de principios de diseño sismorresistente entre nuestros profesionales.

Se podría resumir que en España existe cálculo sismorresistente, comúnmente realizado por programas informáticos y no siempre de manera transparente, pero no

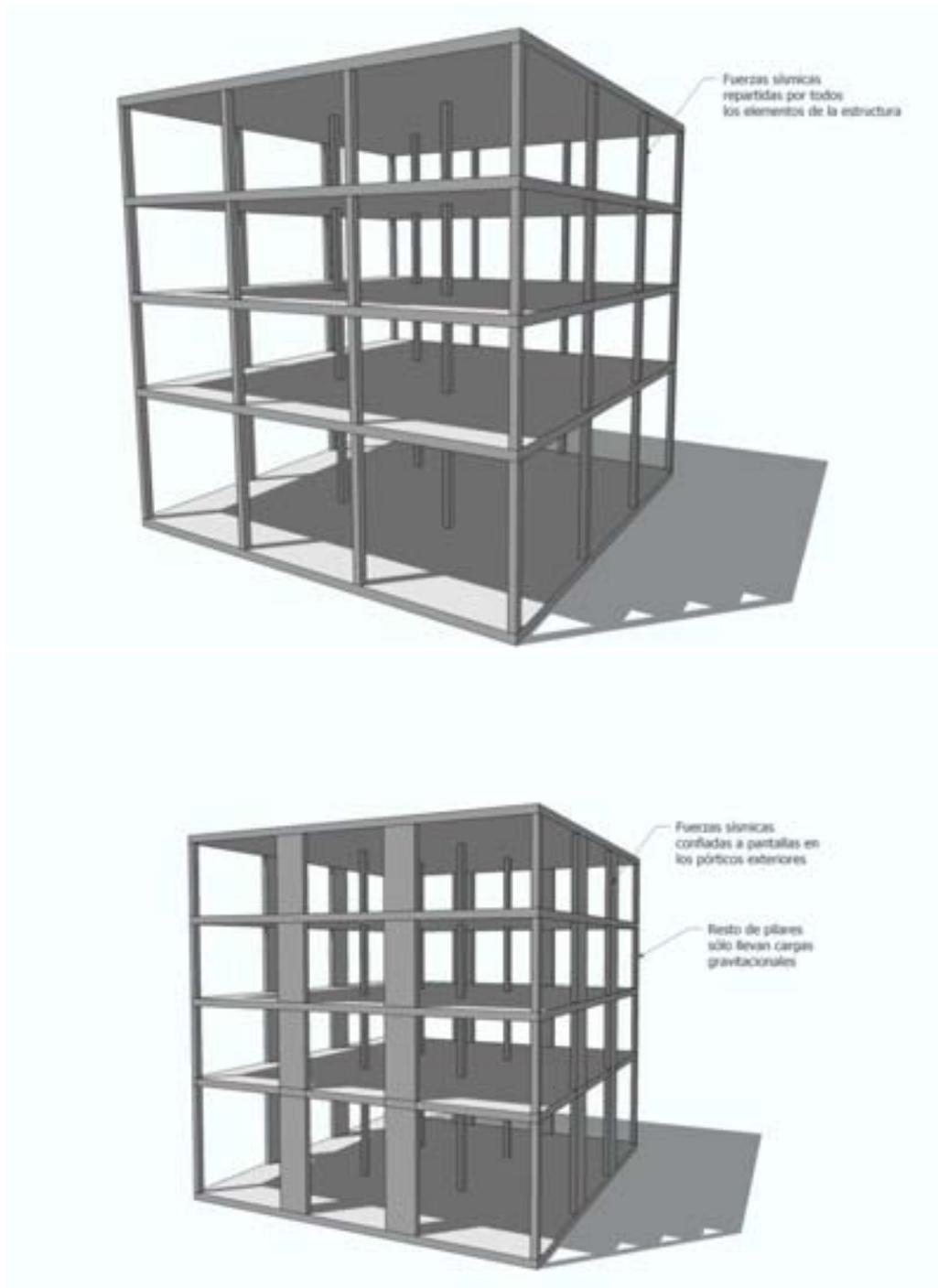
existe diseño ni concepto sismorresistente en nuestras estructuras.

Una nota de optimismo puede ser la ilustración de una torre de 12 plantas en Lorca (fig 7.2.) que no sufrió daños. Poseía pilares apantallados en dos direcciones ortogonales desarrollando una gran rigidez de conjunto, superior a la de los elementos de albañilería de cerramiento. El antepecho de cubierta está realizado en hormigón armado perfectamente confinado por el forjado de cubierta.



**Figura 7.2.** Torre de viviendas de 12 plantas sin daños en Lorca.

Finalmente, volviendo a nuestro esquema en la figura 6.35 del tipo de estructura de viviendas que observamos en Lorca, ilustramos conceptualmente la inserción de pantallas rigidizantes para una perfecta comprensión de la tipología constructiva que podríamos potenciar en zonas sísmicas de nuestro país.



**Figura 7.3..** Integrando un concepto sismorresistente (imagen inferior) en una estructura tipo de forjado plano y pilar débil (imagen superior).

## BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamson NA, Silva WJ (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations, *Earthquake Spectra* 24, 67-97.
- Akkar S., Bommer J.J., (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region and the Middle East, *Seismol Res Let*, 81, 195-206.
- Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K., Smit P.M. (2005), "Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration", *Bull Earthquake Eng*, 3, 1–53.
- Benito B, Carreño E, Jiménez ME, Murphy P, Martínez-Díaz JJ, Tsige M, Gaspar-Escribano JM, García Rodríguez MJ, García-Mayordomo J, Canora C, Álvarez-Gómez JA, García Flores I (2006a) Proyecto RISMUR: objetivos generales y alcance del estudio. Instituto Geográfico Nacional y Protección Civil de Murcia, Madrid.
- Benito B, Gaspar-Escribano JM, García-Mayordomo J, Jiménez ME, García Rodríguez MJ (2006b) Proyecto RISMUR: Evaluación de la peligrosidad sísmica. Instituto Geográfico Nacional y Protección Civil de Murcia, Madrid
- Benito B, Jiménez ME, García Rodríguez MJ, Gaspar-Escribano JM, García-Mayordomo J (2006c) Proyecto RISMUR: Evaluación del riesgo sísmico. Instituto Geográfico Nacional y Protección Civil de Murcia, Madrid
- Benito B, Capote B, Murphy P, Gaspar-Escribano JM, Martínez-Díaz JM, Tsige M, Stich D, García-Mayordomo J, García-Rodríguez MJ, Jiménez-Peña ME, Insua-Arévalo JM, Álvarez-Gómez JA, Canora C (2007). An Overview of the Damaging and Low Magnitude Mw 4.8 La Paca Earthquake on 29 January 2005: Context, Seismotectonics, and Seismic Risk Implications for Southeast Spain. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97: 671-690.
- Benito B, Gaspar-Escribano JM, Martínez-Díaz JJ, Canora C, Álvarez-Gómez JA (2008). An approach for identification of areas with higher expected damage and definition of priority levels for prevention plans in Murcia Province (SE Spain). *Boll. Geofis. Teor. Applicata* 49: 3-16.
- Boore DM, Atkinson GM (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods Between 0.01 s and 10.0 s, *Earthquake Spectra* 24, 99-138.
- Bousquet, J.C. y Montenat, C. (1974). Presence décroche-ments NE-SW plio-Cuaternaires dans les Cordillères Bétiques Orientales (Espagne). Extension et Signification général. *C. R. Acad. Sci. Paris* 278: 2617-2620.
- Bousquet, J.C. (1979). Quaternary strike-slip faults in southeastern Spain. *Tectonophysics*, 52: 277-286.

- Bufo, E., Benito, B., Sanz de Galdeano, C., del Fresno, C., Muñoz, D., Rodríguez, I. (2005). Study of the damaging earthquakes of 1911, 1999, and 2002 in the Murcia, Southeastern Spain, region: seismotectonic and seismic-risk implications. *Bull Seism Soc Am* 95:549–567.
- Campbell KW, Bozorgnia Y (2008). NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s, *Earthq. Spectra* 24, 139-171.
- Capote, R. y Martínez Díaz, J.J. (Editores). (2001) *El Riesgo Sísmico. Prevención y Seguro*. Consorcio de Compensación de Seguros. 256 pp.
- Chiou BSJ, Youngs RR (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra, *Earthquake Spectra* 24, 173-215.
- Crespo MJ (2011). *Análisis de la Peligrosidad Sísmica en La Península Ibérica con un Método Basado en Estimadores de Densidad Kernel*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- García Blanco RM (2009) *Caracterización del potencial sísmico y su influencia en la determinación de la peligrosidad sísmica probabilista*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- García-Mayordomo J (2005). *Caracterización y Análisis de la Peligrosidad Sísmica en el Sureste de España*. Tesis Doctoral Universidad Complutense de Madrid.
- García-Mayordomo J, Gaspar-Escribano JM, Benito B (2007). Seismic hazard assessment of the Province of Murcia (SE Spain): analysis of source contribution to hazard. *J. Seismol.* 11: 453-471.
- Gaspar-Escribano JM, Benito B (2007). Ground Motion Characterisation of Low-to-Moderate Seismicity Zones and Implications for Seismic Design: Lessons from Recent,  $M_w \sim 4.8$ , Damaging Earthquakes in SE Spain. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97: 531-544.
- Gaspar-Escribano JM, Benito B, García-Mayordomo J (2008). Hazard-Consistent Ground Motions in the Region of Murcia (SE Spain). *Bull. Earthquake Eng.* 6: 179-196.
- IGME-UCM (2011). J.J. Martínez Díaz; M.Á. Rodríguez-Pascua; R. Pérez López; J. García Mayordomo; J.L. Giner Robles; F. Martín-González; M. Rodríguez Peces; J.A. Álvarez Gómez; J.M. Insua Arévalo. *Informe Geológico Preliminar del Terremoto de Lorca del 11 de Mayo del año 2011, 5.1 Mw*. Instituto Geológico y Minero de España, 47 pp. Disponible en [www.igme.es](http://www.igme.es).
- ITGE/CPTOPMA-CARM (1992). *Estudio de peligrosidad y vulnerabilidad sísmica en Lorca y su término municipal*. Area de Ingeniería Geoambiental. ITGE.
- Martínez Díaz, J.J. (1998). *Neotectónica y Tectónica Activa del Oeste de Murcia y sur de Almería (Cordillera Bética)*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense Madrid. 470 pp.
- Martínez Díaz, J.J., E. Masana, J.L. Hernández-Enrile Y P. Santanach (2001). Evidence for coseismic events of recurrent prehistoric deformation along the Alhama De Murcia Fault, Southeastern Spain. *Geológica Acta, (antes Acta Geológica Hispánica)*. 36 (3-4): 315-327.
- Martínez Díaz, J.J. y J.L. Hernández-Enrile (2001). Using travertine deformations to characterize paleoseismic activity on an active oblique-slip fault: the Alhama de Murcia Fault (Betic Cordillera-Spain). *Geologica Acta, (antes Acta Geológica Hispánica)* 36 (3-4): 297-313.

- Martinez Guevara, J.B. y Fernandez Navarro-Soto, S. (1986). Catálogo sísmico de la region de Murcia (Sismicidad historica hasta el siglo XVIII). Instituto Geografico Nacional. Informe interno.
- Martinez Solares, J.M. y Mezcua, J. (2002). Catálogo sísmico de la Peninsula Iberica (880 a.C. -1900). Monografia 11, Instituto Geografico Nacional.
- Masana, E., et al. (2004). The Alhama de Murcia fault (SE Spain), a seismotectonic fault in a diffuse plate boundary. seismotectonic implications for the Iberomagrebian region. *J. Geophys. Res.* 109.
- Mezcua, J., Herraiz, M., Buforn, E. (1984). Study of the 6 June 1977 Lorca (Spain) earthquake and its aftershock sequence. *Bull Seism Soc Am* 74:167–179.
- Mezcua J, Rueda J, García Blanco RM (en prensa). A new probabilistic seismic hazard study of Spain. *Nat. Hazards*.
- Michetti, A. M., Guerrieri, L. y Vittori, E. Eds. (2004): The INQUA Scale: An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. *Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia*, 67. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia.
- NCSE-02 (2002). Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación Real Decreto 997/2002, de 27 de Septiembre. Publicada en el BOE, Vol. 244, pp. 35898-35967.
- NCSE-94 (1995). Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación. Real Decreto 2543/1994 de 29 de Diciembre. Publicada en el BOE de 8 de Febrero de 1995, pp. 3935-3980.
- Rey Pastor, A. (1949). La comarca sísmica de Caravaca y el sismo de 23 de junio de 1948. Instituto Geografico y Catastral.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Calvo, J.P., García del Cura, M.A. (2008). Recent seismogenic fault activity in a Late Quaternary closed-lake graben basin (Albacete, SE Spain). *Geomorphology* 102: 169-178.
- Rodriguez de la Torre, F. (1993). Revisión del catalogo sísmico iberico. Años 1801 a 1850. Instituto Geografico Nacional. Informe interno.
- Santanach, P.F., Sanz de Galdeano, C. y Bousquet, J.C. (1980). Neotectónica de las regiones mediterráneas de España (Cataluña y Cordilleras Béticas). *Bol. Geol. Min.*, 91-92: 417-440.
- Santoyo MA, Luzón F. (2008). Stress Relations in Three Recent Seismic Series in the Murcia Region, Southeastern Spain. *Tectonophysics* 457: 86-95.
- Sanz de Galdeano, C. (1983). Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geol.* 59: 157-165.
- Serpelloni, e., G. Vannucci, S. Pondrelli, A. Argnani, G. Casula, M. Anzidei, P. Baldi and P. Gasperini (2007). Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophys. J. Int.* (2007) 169, 1180–1200
- Silva, p.g., M.A. Rodríguez-Pascua, R. Pérez-López, T. Bardají, J. Lario, P. Alfaro, J.J. Martínez-Díaz, K. Reicherter, J. Giménez, J. Giner, J.M. Azañón, J.L. Goy y C. Zazo (2008). Catalogación de los efectos

geológicos y ambientales de los terremotos en España en la Escala ESI-2007 y su aplicación a los estudios paleosismológicos Geo-Temas 10, 2008 (ISSN: 1567-5172)

# ANEXO

## ESCALA MACROSÍSMICA EUROPEA - 1998

### I. No sentido

- a) No sentido, ni en las condiciones más favorables.
- b) Ningún efecto.
- c) Ningún daño.

### II. Apenas sentido

- a) El temblor es sentido sólo en casos aislados (<1%) de individuos en reposo y en posiciones especialmente receptivas dentro de edificios.
- b) Ningún efecto.
- c) Ningún daño.

### III. Débil

- a) El terremoto es sentido por algunos dentro de edificios. Las personas en reposo sienten un balanceo o ligero temblor.
- b) Los objetos colgados oscilan un poco.
- c) Ningún daño.

### IV. Ampliamente observado

- a) El terremoto es sentido dentro de los edificios por muchos y sólo por muy pocos en el exterior. Se despiertan algunas personas. El nivel de vibración no asusta. La vibración es moderada. Los observadores sienten un pequeño temblor o balanceo del edificio, la habitación o de la cama, la silla, etc.
- b) Tintineo de vajillas, cristalerías, ventanas y puertas. Los objetos colgados oscilan. En algunos casos los muebles ligeros tiemblan visiblemente. En algunos casos chasquidos de la carpintería.
- d) Ningún daño.

### V. Fuerte

- a) El terremoto es sentido dentro de los edificios por la mayoría y por algunos en el exterior. Algunas personas se asustan y corren al exterior. Se despiertan muchas personas que duermen. Los observadores sienten una fuerte sacudida o bamboleo de todo el edificio, la habitación o el mobiliario.
- b) Los objetos colgados oscilan considerablemente. Las vajillas y cristalerías chocan entre sí. Los objetos pequeños, inestables y/o mal apoyados pueden desplazarse o caer. Las puertas y ventanas abiertas oscilan o se cierran. En algunos casos se rompen los cristales de las ventanas. Los líquidos oscilan y pueden derramarse de recipientes totalmente llenos. Los animales dentro de edificios pueden ponerse nerviosos.
- c) Daños de grado 1 en algunos edificios de clases A y B de vulnerabilidad.

### VI. Ligeramente dañino

- a) Sentido por la mayoría dentro de los edificios y por muchos en el exterior. Algunas personas pierden el equilibrio. Muchos se asustan y corren al exterior.
- b) Pueden caer pequeños objetos de estabilidad ordinaria y los muebles se pueden desplazar. En algunos casos se pueden romper platos y vasos. Se pueden asustar los animales domésticos (incluso en el exterior).
- c) Daños de grado 1 en muchos edificios de clases A y B de vulnerabilidad ; algunos de clases A y B sufren daños de grado 2 ; algunos de clase C sufren daños de grado 1.

### VII. Dañino

- a) La mayoría de las personas se asusta y corre fuera de los edificios. Para muchos es difícil estar de pie, especialmente en los pisos altos.

- b) Se desplazan los muebles y pueden volcarse los que sean inestables. Caída de gran número de objetos de las estanterías. Salpica el agua de los recipientes, depósitos y estanques.
- c) Muchos edificios de clase A de vulnerabilidad sufren daños de grado 3 ; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase B de vulnerabilidad sufren daños de grado 2 ; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase C de vulnerabilidad presentan daños de grado 2. Algunos edificios de clase D de vulnerabilidad presentan daños de grado 1.

**VIII. Fuertemente dañino**

- a) Para muchas personas es difícil estar de pie, incluso fuera de los edificios.
- b) Se pueden volcar los muebles. Caen al suelo objetos como la televisión, máquinas de escribir, etc. Ocasionalmente las lápidas se pueden desplazar, girar o volcar. En suelo muy blando se pueden ver ondulaciones.
- c) Muchos edificios de clase A de vulnerabilidad sufren daños de grado 4 ; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase B de vulnerabilidad sufren daños de grado 3 ; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase C de vulnerabilidad sufren daños de grado 2 ; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase D de vulnerabilidad presentan daños de grado 2.

**IX. Destructor**

- a) Pánico general. Las personas pueden ser lanzadas bruscamente al suelo.
- b) Muchos monumentos y columnas se caen o giran. En suelo blando se ven ondulaciones.
- c) Muchos edificios de clase A de vulnerabilidad sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase B de vulnerabilidad sufren daños de grado 4 ; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase C de vulnerabilidad sufren daños de grado 3 ; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase D de vulnerabilidad sufren daños de grado 2 ; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase E de vulnerabilidad presentan daños de grado 2.

**X. Muy destructor**

- c) La mayoría de los edificios de clase A de vulnerabilidad sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase B de vulnerabilidad sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase C de vulnerabilidad sufren daños de grado 4 ; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase D de vulnerabilidad sufren daños de grado 3 ; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase E de vulnerabilidad sufren daños de grado 2 ; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase F de vulnerabilidad presentan daños de grado 2.

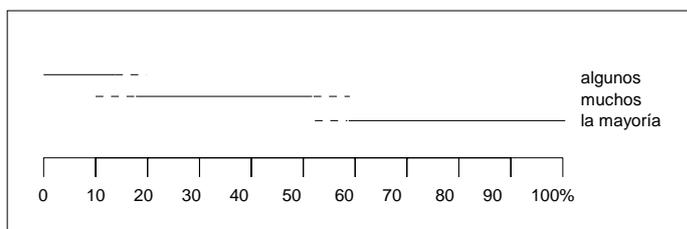
**XI. Devastador**

- c) La mayoría de los edificios de clase B de vulnerabilidad sufren daños de grado 5. La mayoría de los edificios de clase C de vulnerabilidad sufren daños de grado 4 ; muchos de grado 5. Muchos edificios de clase D de vulnerabilidad sufren daños de grado 4 ; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase E de vulnerabilidad sufren daños de grado 3 ; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase F de vulnerabilidad sufren daños de grado 2 ; algunos de grado 3.

**XII. Completamente devastador**

- c) Se destruyen todos los edificios de clases A, B de vulnerabilidad y prácticamente todos los de clase C. Se destruyen la mayoría de los edificios de clase D, E y F de vulnerabilidad. Los efectos del terremoto alcanzan los efectos máximos concebibles.

**DEFINICIONES DE CANTIDAD**



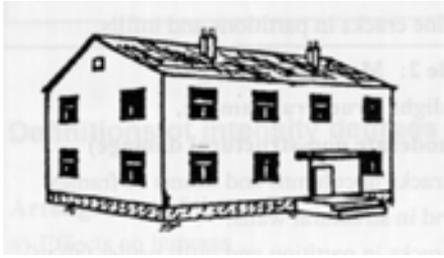
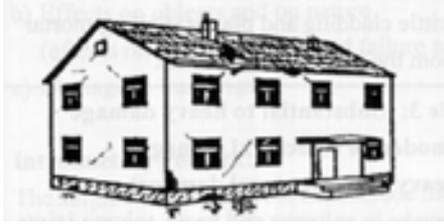
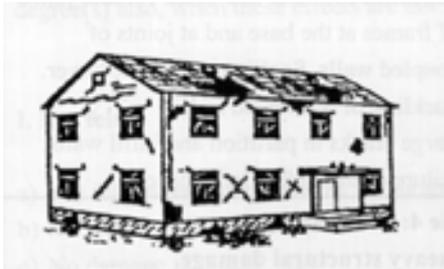
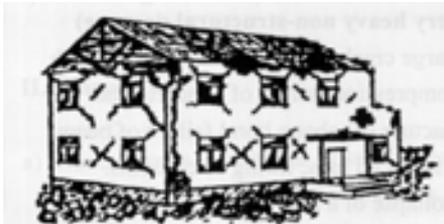
**DIFERENCIACIÓN DE ESTRUCTURAS (EDIFICIOS) EN CLASES DE VULNERABILIDAD (TABLA DE VULNERABILIDAD)**

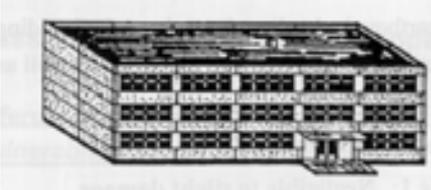
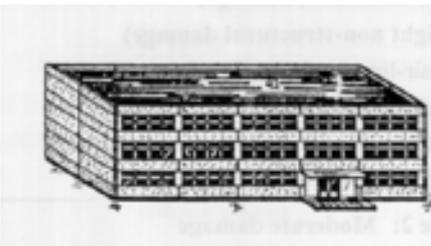
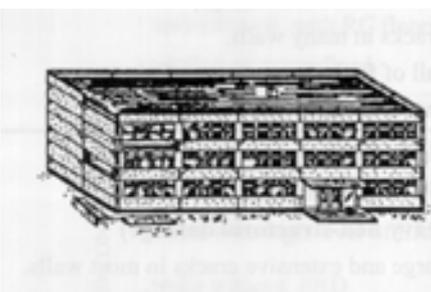
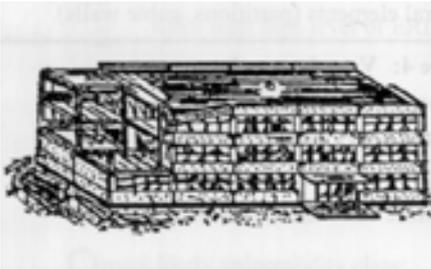
Tipo de estructura		Clase de vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
FÁBRICA	piedra suelta o canto rodado	O					
	adobe (ladrillos de tierra)	O—					
	mampostería	....O					
	sillería		—O....				
	sin reforzar, de ladrillos o bloques	....O....					
	sin reforzar, con suelos de HA		—O....				
	reforzada o confinada			....O—			
HORMIGÓN ARMADO (HA)	estructura sin diseño resistente a terremotos (DRT)	.....—O....					
	estructura con nivel medio de DRT		.....—O—				
	estructura con alto nivel de DRT			.....—O—			
	muros sin DRT		.....O—				
	muros con nivel medio de DRT			....O—			
	muros con nivel alto de DRT				....O—		
ACERO	estructuras de acero			.....—O—			
MADERA	estructuras de madera		.....—O—				

**O** rango más probable de clase de vulnerabilidad ; **—** rango probable ; **----** rango menos probable, casos excepcionales

## CLASIFICACIÓN DE DAÑOS

Nota : la forma en que un edificio se deforma bajo la carga de un terremoto depende del tipo de edificio. Como una clasificación genérica se pueden distinguir los edificios de mampostería y los de hormigón armado.

<b>Clasificación de daños en edificios de fábrica</b>	
<p><b>Grado 1 : Daños de despreciables a ligeros (ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros)</b>                      Fisuras en muy pocos muros.                      Caída sólo de pequeños trozos de enlucido.                      Caída de piedras sueltas de las partes altas de los edificios en muy pocos casos.</p>	
<p><b>Grado 2 : Daños moderados (daños estructurales ligeros, daños no-estructurales moderados)</b>                      Grietas en muchos muros.                      Caída de grandes trozos de enlucido.                      Colapso parcial de chimeneas.</p>	
<p><b>Grado 3 : Daños de importantes a graves (daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves)</b>                      Grietas grandes y generalizadas en la mayoría de los muros.                      Se sueltan tejas del tejado.                      Fractura de chimeneas por la línea del tejado.                      Se dañan elementos individuales no-estructurales (tabiques, hastiales y tejados)</p>	
<p><b>Grado 4 : Daños muy graves (daños estructurales graves, daños no-estructurales muy graves)</b>                      Se dañan seriamente los muros.                      Se dañan parcialmente los tejados y suelos.</p>	
<p><b>Grado 5 : Destrucción (daños estructurales muy graves)</b>                      Colapso total o casi total.</p>	

<b>Clasificación de daños en edificios de hormigón armado</b>	
<p><b>Grado 1 : Daños de despreciables a ligeros (ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros)</b>  Fisuras en el enlucido de elementos estructurales o en la base de los muros.  Fisuras en tabiques y particiones.</p>	
<p><b>Grado 2 : Daños moderados (daños estructurales ligeros, daños no-estructurales moderados)</b>  Grietas en vigas y pilares de la estructura y en muros estructurales.  Grietas en tabiques y particiones; caída de revestimientos y enlucidos frágiles. Caída de mortero de las juntas de paneles prefabricados.</p>	
<p><b>Grado 3 : Daños de importantes a graves (daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves)</b>  Grietas en pilares y en juntas viga/pilar en la base de las estructuras y en las juntas de los muros acoplados. Desprendimiento de revocos de hormigón, pandeo de la armadura de refuerzo.  Grandes grietas en tabiques y particiones ; se dañan paneles de particiones aislados</p>	
<p><b>Grado 4 : Daños muy graves (daños estructurales graves, daños no-estructurales muy graves)</b>  Grandes grietas en elementos estructurales con daños en el hormigón por compresión y rotura de armaduras; fallos en la trabazón de la armadura de las vigas; inclinación de pilares,.  Colapso de algunos pilares o de una planta alta.</p>	
<p><b>Grado 5 : Destrucción (daños estructurales muy graves)</b>  Colapso de la planta baja o de partes (por ejemplo alas) del edificio.</p>	