

VULNERABILIDAD Y DAÑO EN EL TERREMOTO DE LORCA DE 2011

Vulnerability and earthquake damage in Lorca 2011

M. Feriche⁽¹⁾, F. Vidal^(1,2), G. Alguacil^(1,2), M. Navarro⁽³⁾, C. Aranda⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. feriche@iag.ugr.es

⁽²⁾ Dpto. de Física Teórica y el Cosmos. Universidad de Granada. fvidal@ugr.es, alguacil@ugr.es.

⁽³⁾ Dpto. de Física Aplicada. Universidad de Almería. mnavarro@ual.es.

RESUMEN

El análisis de vulnerabilidad y de escenarios de daños sísmicos (EDS), incluyendo herramientas de evaluación basadas en SIG para los usuarios finales, se han desarrollado en programas internacionales (p.e. HAZUS, 1999; RISK-UE, 2004), para apoyar la planificación y priorización de programas de reducción de riesgo sísmico. El 11 de mayo de 2011 ocurrieron dos terremotos de baja magnitud (Mw 4.6 y 5.2 respectivamente), poca profundidad (~4 km) y epicentros muy cercanos a Lorca (< 5km). La estación LOR, en roca, registró una PGA de 0.27g, y 0.36 g, respectivamente. El sismo principal, con intensidad instrumental VIII en Lorca, provocó allí numerosos daños. Este trabajo estudia estos daños y su distribución espacial en Lorca y los compara con los de un EDS virtual obtenido con el Método del Índice de Vulnerabilidad de Risk-UE. Se han identificado 7 tipologías constructivas diferentes (3 de mampostería, 3 de HA y 1 mixta), más las patrimoniales, asignado un I_v^ a cada tipología y calculado el I_v total más probable para cada edificio considerando varios modificadores. Los valores de I_v^* van de 0.40 a 0.74 y los de I_v total de 0.362 a 0.84. El daño medio esperado se ha estimado a partir del I_v y de la intensidad EMS mediante funciones semiempíricas. Las probabilidades de los 5 estados de daño se han obtenido utilizando una distribución de probabilidad binomial o beta equivalente. Los daños observados fueron: 80% de los edificios afectados, 1.164 de ellos tuvieron daños graves y 329 tuvieron que demolerse. La comparación de los resultados ha permitido calibrar la metodología de predicción ciega de daños a partir de una base de datos de vulnerabilidad.*

SUMMARY

Vulnerability and earthquake damage scenario (EDS) analysis, including GIS-based evaluation tools for end-users, have been developed as part of major international programs, (e.g. HAZUS, 1999; Risk-UE, 2004) to support the decision making for planning and prioritizing earthquake risk reduction programs. Two small earthquakes took place on May 11th, 2011 (Mw 4.6 and 5.2, respectively), with a shallow depth (~4 km), and epicenters very close to the city of Lorca (< 5 km). The LOR station, located on rock in the city center, registered a PGA equal to 0.27 g and 0.36 g, respectively. The main earthquake, reached an instrumental intensity of VIII in Lorca, causing heavy damage there. This work studies the building damage and its distribution in Lorca and compares them with a theoretical EDS obtained by applying the Vulnerability Index Method. This method estimates mean damage grade by semiempirical functions than depend on the intensity and the vulnerability index. We identified 7 different construction types (3 masonry, HA 3 and 1 mixed) and cultural heritage ones. An I_v^ was assigned to each type and the total I_v was calculated for each building considering various modifiers. I_v^* values ranging from 0.40 to 0.74 and total I_v from 0.362 to 0.84. The probabilities of damage states are obtained estimating a binomial or beta-equivalent probability distribution. The observed damages were: 80% of the affected buildings, 1,164 of them had severe damage and 329 had to be demolished. Comparison of the results allows calibrate the blind prediction methodology of earthquake damage from a vulnerability database.*

1. INTRODUCCIÓN

El 11 de mayo de 2011 a las 15:05, hora UTC (17:05 hora local), un terremoto de magnitud momento Mw 4.6 sacudió la ciudad de Lorca, causando daños menores e iniciando una serie sísmica. El sismo principal (un terremoto relativamente pequeño Mw 5.2) se produjo a las 17:47 (UTC), y causó en Lorca nueve muertos y ~ 300 heridos. A pesar de la baja magnitud de este terremoto, el daño en los edificios ha sido generalizado: casi un 80% de los edificios se han visto afectados con diferentes grados de daño. La inspección de los edificios afectados (basada en la severidad y la extensión del daño) de 6416 edificios de los 7890 existentes en la ciudad, mostró que 4035 tuvieron daños leves (grados 1-2 EMS), 1328 con daños moderados (grado 2-3), 689 con daños de moderados a graves (grados 3-4) y 329 tuvieron que ser demolidos (grados 4-5). El sismo principal tuvo 113 réplicas durante el primer mes, el 80% en los primeros siete días. Inicialmente el Instituto Geográfico Nacional (IGN) asignó intensidades macrosísmicas máximas de VI y VII (escala EMS) para los dos eventos más grandes en Lorca.

La serie sísmica se ha localizado (López-Comino et al, 2012) en la falla de Lorca-Totana, un segmento de la falla activa de Alhama de Murcia, con un terremoto máximo potencial de magnitud Mw 6,7

y un período de recurrencia media estimada entre 2000 y 5000 años (García-Mayordomo y Martínez Díaz, 2006). En este segmento de falla han tenido lugar varios terremotos históricos como los de 1579, 1783, 1818 y 1907, con una intensidad EMS de VI-VII y el de 1674 con una intensidad de VIII. Recientemente, se han producido 3 pequeños terremotos en las proximidades de Lorca (Mula, 1999; SW Bullas 2002, y La Paca, 2005) con magnitudes Mw de 4,7, 5,0 y 4,8, respectivamente, e intensidades máximas entre VI y VII (Benito et al. 2007).

En el sismo principal, los valores pico de aceleración horizontal (PGA 0,37g) y de velocidad (PGV 35,4cm/s) registrados en la estación sísmica de Lorca (LOR), situada sobre roca en la parte norte-central de la ciudad, permiten clasificar el movimiento del suelo como “severo” en términos de la clasificación Shake-Map (Wald et al., 1999) y corresponderían a una intensidad de grado VIII (escala MM). Estos valores máximos excepcionales pueden ser razonablemente bien explicada por la combinación de los siguientes factores: (i) la proximidad del epicentro sismo de Lorca (<5 km), (ii) la poca profundidad de falla (4,6 km) y (iii) los efectos de la directividad de la fuente fuerte debido a la propagación frente de la ruptura y la dirección de deslizamiento está alineado con la dirección hacia la zona de Lorca. López-Comino et al. (2012) calcularon una

ruptura de ~ 5km de largo, con rumbo NE-SW y similar a la dirección principal de la distribución de las réplicas, detectando un efecto de directividad que sugiere una propagación de la ruptura en dirección clara hacia Lorca.

Un escenario de daños sísmicos (EDS) es una forma de caracterizar y cuantificar el daño provocable por un terremoto específico y su distribución espacial. Pero no siempre ocurren terremotos de una cierta magnitud que produzcan daños en los distintos tipos de edificaciones que sirvan para cotejar los escenarios previstos. Sin embargo, se pueden realizar EDSs a partir de diferentes metodologías, en función de las características del suelo y de las construcciones del área afectada o de la localidad a estudiar, que sirvan de predicciones ciegas de la distribución de los daños

Son numerosos los proyectos internacionales (p.e. HAZUS, 1999; RISK-UE, 2003) que analizan la vulnerabilidad y los escenarios de daños sísmicos (EDS) utilizando herramientas de evaluación basadas en SIG para apoyar la planificación y priorización de programas de reducción de riesgo sísmico.

Los EDS son una herramienta extraordinaria para profundizar en el conocimiento del riesgo sísmico, pues permiten obtener una evaluación de la distribución de los daños, víctimas, pérdidas económicas, escombros a retirar, servicios interrumpidos, etc., con anterioridad a la ocurrencia de un terremoto destructor. Pero también tienen sus limitaciones, puesto que los resultados de los modelos predictivos heredan las incertidumbres de la definición de la acción sísmica y de la vulnerabilidad de los edificios, sin olvidar la correspondiente a la distribución de la población en el momento del terremoto.

La mayor parte de la ciudad de Lorca se asienta sobre suelos sedimentarios con una estructura local muy heterogénea formada por una sucesión de terrazas aluviales y sistemas de depósitos coluviales, datados desde el Plioceno hasta la actualidad (Navarro et al., 2012). Estas condiciones del suelo de la zona urbana de Lorca han influido en las características de la sacudida, causando una distribución espacial heterogénea, tanto de la severidad de la sacudida sísmica, como de los daños en las edificaciones. Este trabajo estudia estos daños y su distribución espacial en Lorca y los compara con los de un EDS virtual obtenido con el Método del Índice de Vulnerabilidad de Risk-UE. Esta comparación nos va a permitir calibrar la metodología de predicción ciega de daños a partir de los datos de daños reales.

Este trabajo analiza la vulnerabilidad de los edificios, los daños causados por el terremoto de 2011 y su distribución espacial en Lorca y los EDS virtuales obtenidos con el Método del Índice de Vulnerabilidad de Risk-UE, (modificado y sin modificar). Esta comparación permite calibrar la metodología de predicción ciega de daños a partir de los datos de daños reales.

2. METODOLOGÍA

Para la evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones de este trabajo se ha utilizado el Método del Índice de Vulnerabilidad (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004)

En este método, las diversas tipologías constructivas se caracterizan mediante un índice de vulnerabilidad (I_v) cuyos valores representan una clasificación que cuantifica el comportamiento sísmico del edificio. Estos valores varían entre 0 (edificios más sismorresistentes) y 1 (los más vulnerables).

Para cada tipo de edificio se consideran varios índices de vulnerabilidad: I_v^{*} es el valor más probable, I_v⁻, I_v⁺ el intervalo plausible; I_v^{min} e I_v^{max} son los límites inferior y superior del índice de vulnerabilidad. La Tabla 1 muestra los valores de I_v para las tipologías encontradas en Lorca.

Los índices de vulnerabilidad promedio se corrigen en función de diversos parámetros, denominados Modificadores de vulnerabilidad, M_R y M_C, que incrementan el I_v en función de la ejecución, del estado de conservación del edificio, la edad, la altura, etc., Por lo tanto, el valor del índice de vulnerabilidad I_v de cada

edificio se calcula simplemente sumando al I_v^{*} de cada tipo de edificio dos factores modificadores M_R y M_C :

$$I_v(total) = I_v^* + M_R + M_C \tag{1}$$

Tipo	Descripción	Índices de vulnerabilidad				
		I _v ^{min}	I _v ⁻	I _v [*]	I _v ⁺	I _v ^{max}
M1.1	Muros de carga con mampostería de piedra y cascotes	0.62	0.810	0.873	0.980	1.02
M3.1	Muros de carga de fábrica y forjados de madera	0.46	0.650	0.740	0.830	1.02
M3.3	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y cerámicos.	0.46	0.527	0.704	0.830	1.02
M3.4	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de losas de hormigón armado	0.30	0.490	0.616	0.793	0.86
M4	Muros de carga de mampostería confinados o reforzados	0.14	0.330	0.451	0.633	0.70
RC1	Estructuras de Hormigón resistentes al momento	-0.02	0.047	0.442	0.800	1.02
RC3.1	Estructuras de Hormigón con tabiquería regular	-0.02	0.007	0.402	0.760	0.98
RC3.2	Estructuras de HA irregulares tabicadas	0.06	0.127	0.522	0.880	1.02
S2	Estructuras metálicas arriostradas	-0.02	0.467	0.287	0.480	0.70
S3	Metálicas con muros de relleno de fábrica	0.14	0.330	0.484	0.640	0.86

Tabla 1- Índices de vulnerabilidad representativos de las edificaciones de Lorca (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). (Vulnerability index for Lorca buildings)

El Modificador Regional de Vulnerabilidad M_R se introduce para tener en cuenta la calidad de la construcción de los edificios a escala regional (Tabla 2).

Tabla 2 – Modificador regional utilizado en edificaciones de Lorca. (Regional modifier used in buildings in Lorca)

Período construc.	Normativas Sísmicas Españolas aplicables	Nivel de diseño sísmico	Modificador Regional Lorca		
			Mampostería / Fábrica de Ladrillo		Hormig. Armado
			M3.x	Rehabilitada / M4 y M5	RC
≤1925	----	No	+0.14	0.08	--
1926-1945	----	No	+0.12	0.08	--
1946-1960	----	No	+0.10	0.08	+0.14
1961-1969	MV-101 (1964-69)		+0.08	0.08	+0.12
1970-1976	PGS-1 (1970-76)	Bajo	--	0.08	+0.10
1977-1996	PDS-1, 1974 (1977-96)	Bajo	--	0.08	+0.10
1997-2004	NCSE-94 (1997-2004)	Moderado	--	0.08	+0.08
>2004	NCSE-02 (>2004)	Moderado	--	0.08	0

Los modificadores por comportamiento M_C valoran las características particulares de cada edificio y tienen en cuenta los efectos debidos a diferentes factores: nº de plantas, estado de conservación, morfología del suelo, irregularidades en planta o en

altura, posición en agregado, etc. Se aplican a las dos las dos tipologías predominantes: mampostería y hormigón armado. Algunos de estos valores (por irregularidad vertical o planta diáfana, pilar corto y pendiente) se han incrementado en función de los daños observados en Lorca durante los terremotos de mayo de 2011, ya que estos parámetros han tenido una influencia en los daños mucho mayor de la prevista previamente en la metodología. Las Tablas 3 y 4 muestran los valores de M_c estimados por Milutinovic y Trendafiloski (2003) utilizados en este estudio, tanto para edificaciones de Mampostería como para edificaciones de hormigón armado, así como los obtenidos para Lorca (en negrita) a partir de los daños de los terremotos de mayo de 2011.

Tabla 3 – Valores del Modificador por comportamiento utilizados para edificios de mampostería utilizados en el estudio (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). (Values of the Behavior Modifier for masonry buildings used in this study)

Puntuaciones M_c para edificios de Mampostería			
Factores de comportamiento	Parámetros	Valores M_c	M_c Lorca
Estado de conservación	Buen mantenimiento	-0.04	-0.04
	Mal mantenimiento	+0.04	+0.04
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.02	(≤1925) -0.04
			(>1925) +0.02
	Medio (3, 4 o 5)	+0.02	(≤1925) +0.06
Piso blando	Alto (6 o más)	+0.06	+0.06
	Planta diáfana	+0.04	+0.04
Edificio en agregado: posición en la manzana	Intermedio	-0.04	-0.04
	Esquina	+0.04	+0.04
Morfología del terreno	Terminal	+0.06	+0.06
	Pendiente	+0.02	+0.04

Tabla 4 – Valores del Modificador por comportamiento para edificios de hormigón armado utilizados en el estudio (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). En negrita aparecen los valores estimados para Lorca a partir de los daños del terremoto en Lorca. (Values of the Behavior Modifier for RC buildings used in this study. Values estimated from earthquake damage in Lorca are shown in bold)

Puntuaciones M_c para edificios de hormigón armado			
FACTORES DE COMPORTAMIENTO	Nivel de Código Sismorresistente		
	Bajo	Medio	Alto
Nivel de Código	+0.16	0	-0.16
Mantenimiento deficiente	+0.04*	+0.02	0
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.04	-0.04
	Medio (3-5)	0	0
Irregularidad Vertical	Alto (> 5)	+0.08	+0.06
		+0.04	+0.02
(Lorca)	+0.06	+0.06	
Columna corta	+0.02	+0.01	0
(Lorca)	+0.08	+0.08	
Edificios en agregado: esquina	+0.04	0	0
(Lorca) Terminal	+0.06		
Morfología del terreno	Pendiente	+0.02	+0.02
	(Lorca)	+0.04	+0.04
Precipicio/acant.	+0.04	+0.04	+0.04

(*) Edificaciones con más de 50 años

Para calcular la distribución de daño esperado se utiliza la función de vulnerabilidad (Ecuación 2) que fue propuesta por Sandi y Floricel (1995) y usada por Giovinazzi y Lagomarsino (2002) para la evaluación estadística de daños a edificios ordinarios. Esta función

permite evaluar el grado de daño promedio, μ_d , esperado a partir de los valores de índice de vulnerabilidad, I_v , de un conjunto de edificios y la intensidad, I , que los afecta. Para obtener las probabilidades de daño asociadas a cada grado de daño y su correspondiente número de edificios se utiliza en este caso la distribución beta como lo recomienda Giovinazzi (2005).

$$\mu_d = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 I_v - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (2)$$

El comportamiento del suelo ante la sacudida sísmica analizado por Navarro et al. (2012) ha sido el punto de partida para la obtención de la distribución de intensidades utilizada en la obtención de los diferentes escenarios.

3. MAPA DE VULNERABILIDAD

Para la realización de este estudio ha sido necesario el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en el que se han integrado, por un lado, los datos de las edificaciones aportados por el catastro y por otro, los del comportamiento del suelo. A partir de los datos catastrales, inspecciones y teniendo en cuenta parámetros como el año de construcción y la altura, hemos podido realizar una clasificación de las diferentes tipologías constructivas y se ha elaborado una matriz de tipologías de la edificación (MTE). Dicha clasificación se ha completado con la inspección de los daños provocados por los terremotos de 2011 “realizada in situ”. A partir de la MTE se han creado una serie de ventanas temporales sobre las que hemos basado la selección de los edificios pertenecientes a las dos grandes tipologías constructivas (mampostería y hormigón armado) representadas en la Tabla 5. El resto de tipologías (acero, mixtas, etc) se han incluido en estos dos grandes grupos.

Tabla 5 - Matriz de tipologías de Edificios (MTE) para Lorca (Building Typology Matrix for Lorca)

CLASIFICACIÓN DE LA EDIFICACIÓN EN LORCA (MTE)		
Año construc. (tipo asignado)	Nº plantas	Tipología constructiva
Hasta 1945 (M 3.1)	Todas	Mampostería ó fábrica de ladrillo/forjados de madera.
		Muros de carga de sillería y forjados de madera
1946-1959 (M 3.4)	todas	Fábrica de ladrillo y forjados de hormigón armado (HA).
		Fábrica confinada de bloques de hormigón y forjado de HA
1960-1977 (RC 1)	≤ 5	Pórticos de Hormigón armado con vigas descolgadas/ semidescolgadas
	>5	Pórticos de Hormigón armado con vigas descolgadas/semidescolgadas
1977-1996 (RC 1)	≤ 5	Forjado reticular.
	> 5	Pórticos de HA con vigas planas
1997-2004 (RC 3.2)	≤ 5	Pórticos de HA/vigas semidescolga.
	> 5	Pórticos de HA con vigas planas
>2004 (RC 3.1)	todas	Forjado reticular.
		Estructura metálica y/ó mixta
		Pórticos de HA con vigas planas
		Forjado reticular
		Estructura metálica y/ó mixta

Tras haber analizado los daños sufridos por las diferentes tipologías constructivas a causa de los terremotos de mayo de 2011, se ha podido comprobar que los valores de los modificadores por comportamiento que intervienen en la evaluación de la vulnerabilidad, tal y como los calcularon Milutinovic y Trendafiloski (2003) se han quedado cortos en el caso de Lorca. Por esta razón se

han incrementado los que han influido directamente en los daños (piso blando, pilar corto, posición en la manzana y pendiente del terreno), tal y como ya se ha reflejado en la Tabla 4. Un cómputo del número de edificios y los Iv totales correspondientes se muestran en la Tabla 6, donde podemos apreciar la ostensible variación entre el Iv1 (sin modificar) y el Iv2 (modificado).

Tabla 6 – Distribución de los edificios de Lorca por tipología e Iv

Tipología	Iv*	Rango Iv1	Rango Iv2	Nº de edificios
M 3.1	0.74	0.86-1.0	0.76-0.84	2835
M 3.4	0.616	0.716-0.778	0.64-0.68	783
RC 3.2	0.522	0.46-0.56	0.482-0.68	614
RC1	0.442	0.562-0.642	0.562-0.642	3456
RC 3.1/S5	0.402	0.312-0.412	0.362-0.462	202

La variación entre los valores del índice de vulnerabilidad con modificaciones y sin ellas es aún más apreciable en las Figuras 1 y 2.

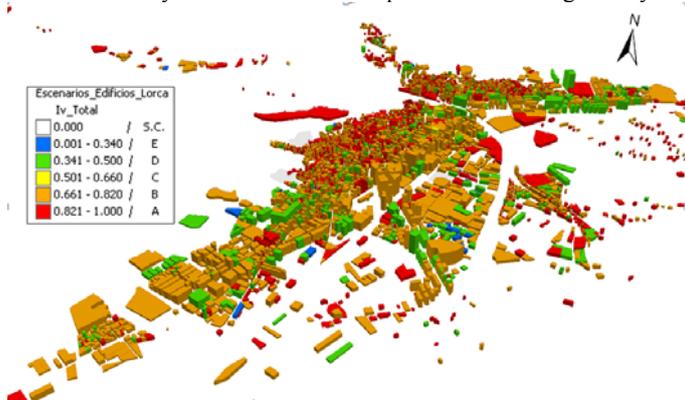


Figura 1 – Vulnerabilidad de las edificaciones en función del Iv1 (sin modificar) y su equivalencia con las clases de vulnerabilidad de la EMS98. (Vulnerability of buildings based on Iv1 (unmodified) and their equivalence with EMS98 vulnerability classes).

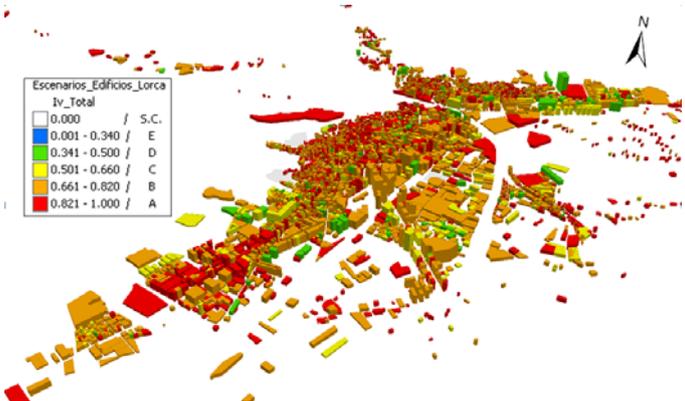


Figura 2 – Vulnerabilidad de las edificaciones en función del Iv2 (modificado) y su equivalencia con las clases de vulnerabilidad de la EMS98. (Vulnerability of buildings based on Iv2 (modified) and their equivalence with EMS98 vulnerability classes).

En ambas figuras se puede apreciar cómo el casco antiguo de la ciudad aparece como la zona más vulnerable, con numerosas edificaciones de clase A (color rojo) y el resto de clase B (color naranja). La existencia de gran cantidad de edificios patrimoniales da, así como de cortijos de elevada vulnerabilidad, dan lugar a la gran dispersión del color rojo (correspondiente a la clase A) por toda la ciudad. En la Fig.2 se aprecia un incremento de la vulnerabilidad en la zona suroeste de la ciudad, concretamente en el barrio de La Viña, el más dañado por los terremotos de mayo de 2011. En esta zona, la tipología más representativa es una estructura de pórticos de hormigón armado con semisótano (pilares cortos) o piso débil construida con anterioridad al año 2002.

4. ESCENARIOS DE DAÑOS

Existen numerosas formas de evaluar los escenarios de daño sísmico (EDS), bien mediante el grado de daño sufrido por las edificaciones, el número de edificios que han quedado inhabitables, el número de víctimas, las pérdidas económicas ocasionadas estimadas en coste de reposición, etc.

Para la elaboración de este estudio se ha tenido como punto de partida el EDS del terremoto del 11 de mayo de 2011 (Fig. 3). Este EDS nos ha proporcionado una visión real de la distribución de los daños en las edificaciones, analizando la influencia de la vulnerabilidad y del suelo en los mismos.

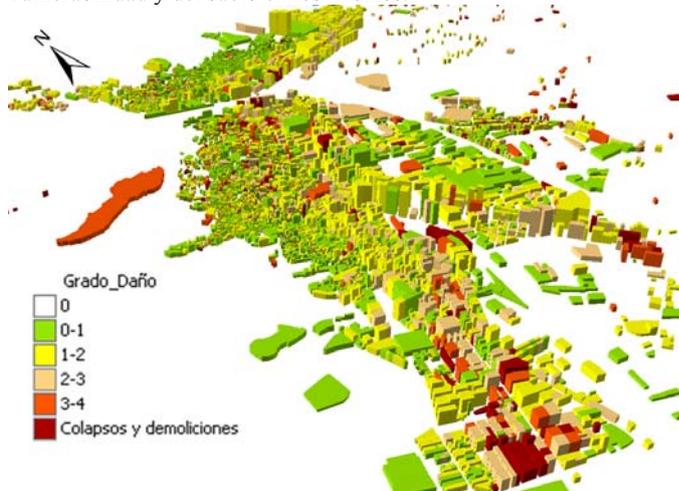


Figura 3 – EDS real correspondiente al terremoto del 11-5-2011. Distribución de los diferentes grados de daño (EMS98). (Real EDS for the 11-5-2011 earthquake. Distribution of the different damage degrees EMS98).

En la Figura 3 se puede apreciar que el daño provocado por el terremoto fue generalizado, dejando 9 víctimas mortales, y unos 324 heridos. El 80% de las edificaciones resultaron afectadas con diferentes grados de daño. De los 7890 edificios existentes en Lorca según datos catastrales, al cabo de 1 semana de haberse producido el terremoto, se habían inspeccionado un total de 7839 (informe del IGN), de los cuales, 6416 tienen ficha de inspección del Ayuntamiento de Lorca. Estas fichas se han clasificado en colores (siguiendo criterios de funcionalidad) y georreferenciado para su publicación en la página web de dicho ayuntamiento (www.lorca.es/ficheros/file/sitLorcaSeismo/index.asp). Estos datos se han convertido a grados de daño de la EMS98 tras un análisis de los daños realizado “in situ” y, una vez introducidos en un SIG elaborado a partir de los datos proporcionados por el Catastro (Fig. 3), se han obtenido los siguientes resultados: 3339 (42.3%) edificios de grado 0-1, 2868 (36.3%) de grado 1-2, 915 de grado 2-3, 439 de grado 3-4 y 329demolidos, de los que sólo colapsó uno durante el terremoto.

Las zonas más afectadas fueron el casco histórico (y edificios de patrimonio) y el barrio de La Viña, donde se ubicaba el único edificio que colapsó durante el terremoto (Fig. 4). Este edificio, construido en 2001, de estructura reticular (losa fuerte-pilar débil) de 3 alturas y semisótano, estaba ubicado en una pendiente (con los pilares cortos de diferentes longitudes). Estas características unidas a las de la sacudida fueron, probablemente la causa del colapso de este edificio, que estaba prácticamente vacío tras el primer terremoto (se rescató a una familia que quedó atrapada y el cerramiento mató a una persona que pasaba por la calle). Todas Las víctimas fueron provocadas por caída de cerremientos y antepechos (bien se encontraban en la calle, bien salían corriendo del interior de los edificios).



Figura 4 – Edificio colapsado durante el terremoto del 11-5-2011. (Building collapsed during the 11-5-2011 earthquake).

Del análisis de los daños cabe destacar los 328 edificios que han tenido que ser demolidos tras el terremoto, debido a los daños estructurales sufridos, de los cuales 150 eran de hormigón armado (HA) y el resto de mampostería. La mayoría de los de HA presentaban daños las plantas baja y primera en edificios con plantas diáfanos o pilares cortos (Fig. 5), mientras que los de mampostería presentaban grietas en los muros de carga y pérdida de la conexión entre los elementos horizontales y verticales (Fig. 6).



Figura 5 – Daños estructurales en edificios de HA: arriba, por piso débil; abajo por pilar corto (IAG, 2011). (Structural damages in RC buildings: above, soft stories; below, short columns. IAG, 2011).



Figura 6 – Daños estructurales en edificios de mampostería. (Structural damages in masonry buildings).

Resulta interesante la distribución del daño en función del año de construcción de los edificios y del número de plantas, representado en la Figura 7. En dicha figura se puede apreciar que, tanto los edificios demolidos como los de daños graves son, en su mayoría anteriores a 1997 y, respecto al número de plantas, los daños se concentran en edificios de 1 a 5 plantas..

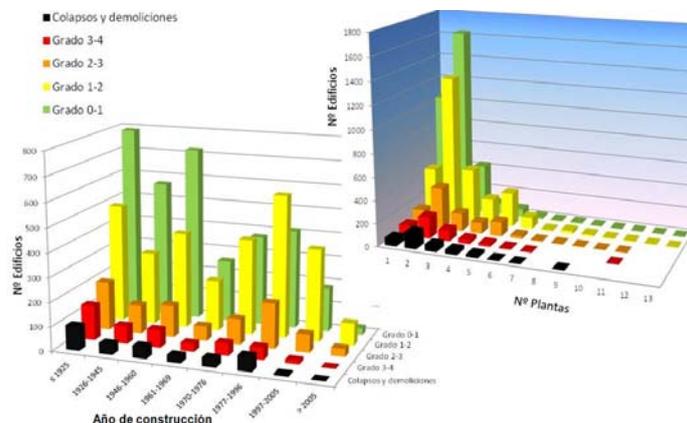


Figura 7 – Distribución de los daños del terremoto del 11-5-2011 en función del año de construcción y del número de plantas. (11-5-2011 earthquake damage distribution respecting year of build and number of stories).

Además, el número de edificios de dos plantas es elevado pero son antiguos (desde el 77 en adelante hay 2120 edificios afectados). Este dato es muy interesante, pues se supone que ya había aplicación de normas sismorresistentes y las normas de hormigón estaban muy evolucionadas. Por esta razón nos hemos aventurado a realizar un análisis de los daños en función de los dos períodos más significativos en cuestión de normativas de hormigones y sismorresistentes:

- 1) Período 1991-2001: normas EH-91 y NCSE-95.
- 2) Período 2001-2009: normas EHE-98 y NCSE-02.

Al realizar el análisis hemos podido comprobar que los daños se concentran en aquellos edificios construidos con anterioridad al año 1991, lo que refleja una alta repercusión de las normativas en los daños.

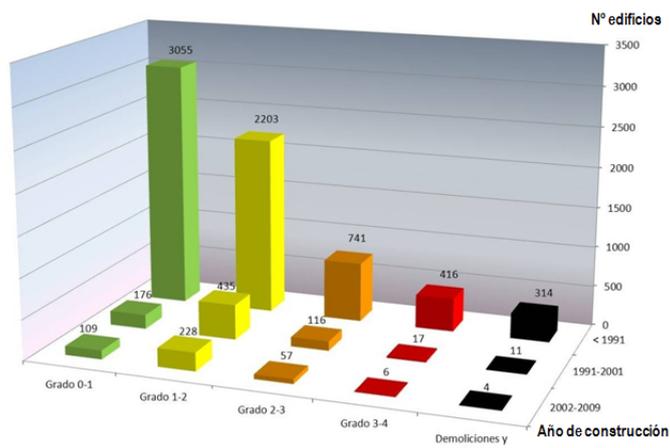


Figura 8 – Distribución de los daños del terremoto del 11-5-2011 en función de la entrada en vigor de las normativas tecnológicas. (11-5-2011 earthquake damage distribution respecting year of build and number of stories).

Donaire et al (2012) realizan un estudio para estos mismos períodos de tiempo (teniendo en cuenta el número de plantas) para obtener un prototipo de edificio especialmente castigado por los terremotos de 2011. Dicho prototipo ha resultado ser una estructura de pórticos de HA de 4 alturas con la planta baja más alta que el resto.

Una vez analizado el EDS del terremoto de mayo de 2011, nos planteamos como necesaria la comparación de dicho escenario con otro ciego o virtual estimado a partir de los datos catastrales y del estudio del movimiento del suelo realizado por Navarro et al. (2012). Estos autores han clasificado las estructuras geológicas existentes en Lorca de acuerdo al Eurocódigo 8 (EC8, 1998), usando los valores de Vs³⁰ obtenidos mediante la técnica del SPAC complementados con valores de Vs de perfiles de refracción superficiales (IGME, 1992). Según estos datos, la mayor parte de la ciudad de Lorca se asienta sobre suelos sedimentarios con una estructura local muy heterogénea formado por una sucesión de terrazas aluviales y sistemas de depósitos coluviales, datados desde el Plioceno hasta la actualidad (Fig. 9). Estas condiciones del suelo de la zona urbana de Lorca han influido en las características temblor, causando una distribución espacial heterogénea, tanto de la severidad de la sacudida sísmica, como de los daños en las edificaciones.

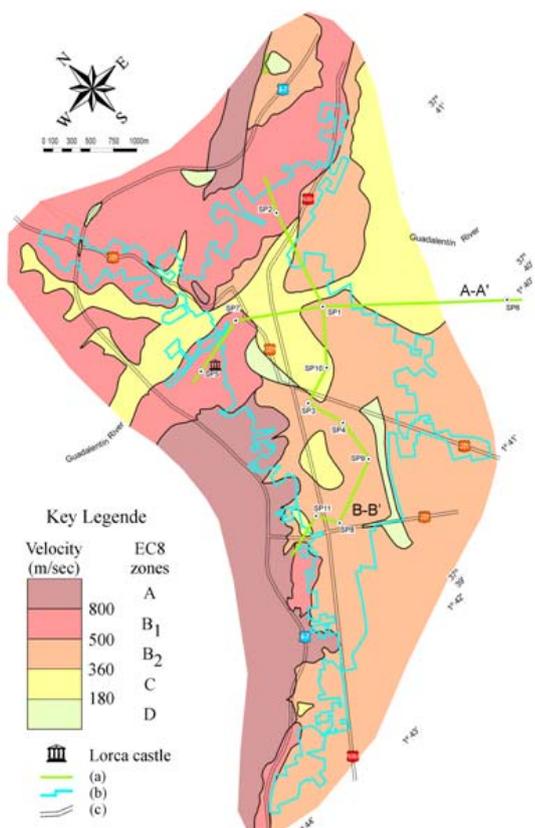


Figura 9 – Clasificación Vs³⁰ del suelo de Navarro et al. (2012). (Lorca soil classification using VS30 value).

Una vez que se ha estimado, tanto la vulnerabilidad de las edificaciones, como el comportamiento del suelo ante la sacudida sísmica, podemos evaluar el daño esperado. Para ello se ha utilizado la función de vulnerabilidad (Ecuación 2) propuesta por Sandi y Floricel (1995) y usada por Giovinazzi y Lagomarsino (2002) para la evaluación estadística de daños a edificios ordinarios. Esta función permite evaluar el grado de daño medio, μ_d , esperado a partir de los valores de índice de vulnerabilidad (Iv) de un conjunto de edificios y la intensidad (I) que los afecta. Para obtener las probabilidades de daño asociadas a cada grado de daño y su correspondiente número de edificios se utiliza en este caso la distribución beta como lo recomienda Giovinazzi (2005). Los grados de daño considerados por este método son los mismos que maneja la escala macrosísmica EMS-98 (de 1 a 5), a los que añade un grado más (el 0) para abarcar los edificios que no han sufrido ningún tipo de daño.

Otra manera de evaluar el grado de daño es mediante la estimación del estado o grado de daño medio, Dm, basado en que la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño sigue una distribución Binomial o Beta equivalente para una determinada intensidad macrosísmica. Este tipo de distribuciones se caracteriza

mediante un solo parámetro, el grado de daño medio o más probable, Dm, que suele definirse mediante la siguiente expresión:

$$D_m = \sum_{i=0}^N iP[D_i]$$

donde N es el número de estados de daño considerados, i es el número correspondiente al estado de daño Di (toma valores de 0 a N, en este caso de 0 a 5) y P[Di] es la probabilidad de ocurrencia del estado de daño i (de 0, para daño nulo, a 1 para daño total o colapso). El Dm es un parámetro representativo del daño más probable (aporta una visión del daño global), por lo que es muy útil a la hora de representar escenarios de daño sísmicos (Lantada, 2007). Este parámetro es similar a μ_D y, de hecho representan lo mismo, pero se han obtenido mediante operaciones diferentes, por lo que su valor no es exactamente el mismo pero sí muy similar.

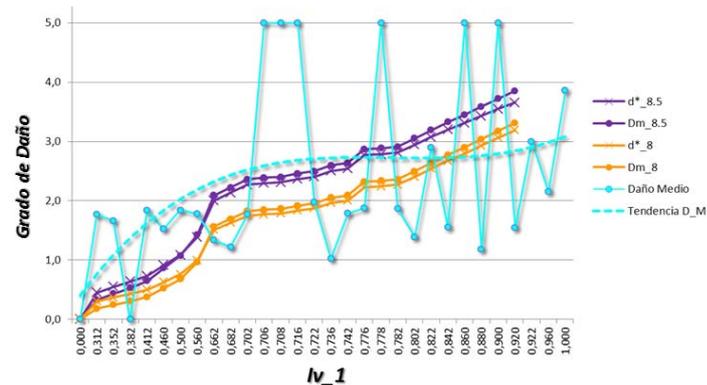
Los valores de I considerados para cada uno de los escenarios estudiados son: 7.0, 7.5, 8.0, y 8.5. Los índices de vulnerabilidad utilizados para los escenarios finales son los Iv2, calculados a partir de los nuevos modificadores obtenidos para Lorca. Los valores de μ_d resultantes, junto con la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los grados de daño de la EMS98 y el Dm (daño medio obtenido a partir de las probabilidades de daño) se muestran en las Tablas 7 y 8 para cada una de las tipologías más abundantes en Lorca, mampostería o fábrica de ladrillo/piedra y HA.

Tablas 7 y 8 – Matrices de probabilidad de daño en edificios de mampostería y HA para valores extremos del Índice de Vulnerabilidad y cada uno de los escenarios. (Damage probability matrix to masonry and RC buildings for Iv extreme values).

Edificios de muros de fábrica (3621)										
Escenario	Min / Max	Rango Iv	Pavp av	Probabilidades para el estado de daño					Rango Dm	
				0	1	2	3	4		5
1 (I = 8.0, I, 1)	Min	0.726	1.9649	0.0515	0.2618	0.3598	0.2449	0.0769	0.0051	2.0493
	Max	0.96	3.4312	0.0006	0.0205	0.1163	0.2936	0.3934	0.1756	3.5855
2 (I = 8.5, I, 1)	Min	0.726	2.5	0.0138	0.1365	0.3126	0.3386	0.1761	0.0223	2.5938
	Max	0.96	3.858	0.0001	0.0095	0.0449	0.1768	0.3962	0.3771	4.0953
3 (I = 8.0, I, 2)	Min	0.726	1.9649	0.0515	0.2618	0.3598	0.2449	0.0769	0.0051	2.0493
	Max	1.1	4.1188	0	0.0015	0.0188	0.1003	0.3207	0.5388	4.4139
4 (I = 8.5, I, 2)	Min	0.726	2.5	0.0138	0.1365	0.3126	0.3386	0.1761	0.0223	2.5938
	Max	1.1	4.3923	0	0.0002	0.0051	0.0383	0.1846	0.7717	4.7223
5 (I = 7.0, I, 2)	Min	0.726	1.0672	0.3083	0.4095	0.2128	0.0615	0.0078	0.0002	1.0516
	Max	1.1	3.3119	0.001	0.0281	0.1413	0.3177	0.3731	0.1389	3.45
6 (I = 7.5, I, 2)	Min	0.726	1.4767	0.1447	0.377	0.3138	0.1368	0.0267	0.001	1.5265
	Max	1.1	3.7594	0.0001	0.0072	0.0583	0.2064	0.408	0.3199	3.9746

Edificios de Hormigón Armado (4272)										
Escenario	Min/Max	Iv	Iv	Probabilidades para el estado de daño					Dm	
				0	1	2	3	4		5
1 (I = 8.0, I, 1)	Min	0.312	0.3035	0.8453	0.1291	0.0228	0.0027	0.0001	0	0.1832
	Max	0.922	3.2008	0.0016	0.0369	0.1657	0.3354	0.3497	0.1107	3.3267
2 (I = 8.5, I, 1)	Min	0.312	0.4538	0.7341	0.2114	0.0474	0.0067	0.0004	0	0.328
	Max	0.922	3.666	0.0002	0.01	0.0729	0.2336	0.4116	0.2717	3.8615
3 (I = 8.0, I, 2)	Min	0.362	0.3909	0.7821	0.177	0.0359	0.0047	0.0003	0	0.2641
	Max	0.942	3.324	0.001	0.0273	0.1387	0.3155	0.3754	0.1422	3.4636
4 (I = 8.5, I, 2)	Min	0.362	0.5791	0.6584	0.2758	0.0746	0.0124	0.0009	0	0.4656
	Max	0.942	3.7695	0.0001	0.0069	0.0569	0.2034	0.4072	0.3254	3.9869
5 (I = 7.0, I, 2)	Min	0.362	0.1716	0.528	0.0623	0.0088	0.0009	0	0	0.0827
	Max	0.942	2.2697	0.025	0.1865	0.3436	0.3051	0.1277	0.0122	2.3607
6 (I = 7.5, I, 2)	Min	0.362	0.2602	0.8745	0.1061	0.0174	0.0019	0.0001	0	0.147
	Max	0.942	2.8109	0.0057	0.0824	0.253	0.3595	0.2522	0.0472	2.9117

Comparando los valores del daño medio (μ_D y Dm) para cada uno de los valores de Iv (Iv1 sin corregir e Iv2 o corregido) y cada uno de los escenarios (7.0, 7.5, 8.0, y 8.5) con los valores del daño medio real correspondientes al terremoto del 11-5-2011, se ha podido comprobar que los valores para Iv1 están por debajo del daño real, tanto para I=8, como para I= 8.5 (Fig. 10).



(3)

Figura 10 – Comparación del Dm del terremoto del 11-5-2011 (turquesa) con los Dm/ μ_D correspondientes a los escenarios de I= 8.0 y 8.5 para Iv_1. (Comparison between Dm 2011 earthquake and the Dm/ μ_D with I= 8.0 and 8.5 scenarios for Iv_1).

Por esta razón se decidió ponderar algunos de los modificadores de comportamiento, tal y como se reflejó en el apartado anterior anterior, y así obtener un Iv_2 más próximo a la realidad que el Iv_1. La Figura 11 refleja este hecho: el Dm real (turquesa) coincide con el Dm_8.5 hasta un Iv_2 de 0.6, está por encima del Dm_8 hasta un Iv_2 de 0.8, del Dm_7.5 hasta un Iv_2 de 0.88 y del Dm_7 hasta un Iv_2 de 1. Con esto queremos decir que los daños provocados por los terremotos del 11-5-2011 corresponden a una intensidad media de VIII (están por encima del 8.5 en algunos casos y superan claramente los correspondientes a I= 7).

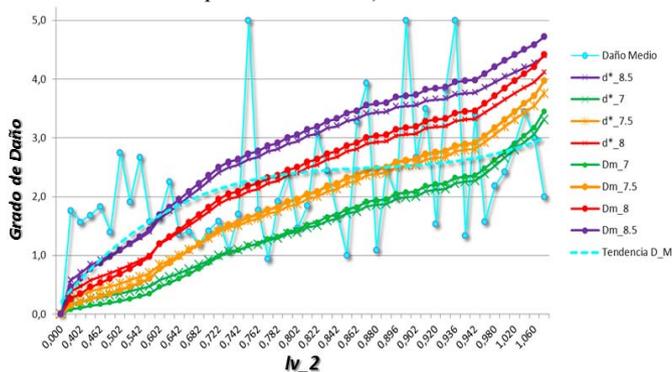


Figura 11 – Comparación del Dm del terremoto del 11-5-2011 (turquesa) con los Dm/ μ_D correspondientes a los escenarios de I= 7.0, 7.5, 8.0 y 8.5 para Iv_2. (Comparison between Dm 2011 earthquake and the Dm/ μ_D with I= 7.0, 7.5, 8.0 and 8.5 scenarios for Iv_2).

También se han comparado los daños del terremoto de 2011 con los obtenidos en este estudio (Fig. 12) y se ha podido apreciar la irregular distribución para cada uno de los escenarios. Además se aprecia que la distribución más similar a la del terremoto de 2011 es la correspondiente al escenario de I= VII, aunque no refleja los daños superiores a 3.5.

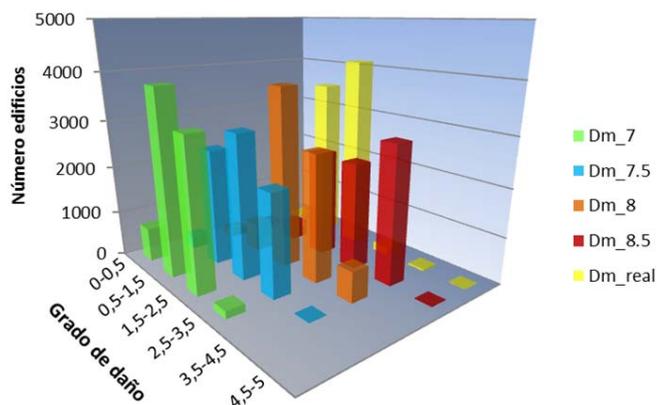


Figura 12 – Distribución del grado de daño para Iv_2 para cada uno de los escenarios respecto del terremoto del 11-5-2011. (Iv_2 damage distribution for each scenario respecting the 11/05/2011 earthquake damage scenario).

Basándonos en los gráficos anteriores y en el mapa de comportamiento del terreno de la Figura 9, hemos elaborado un escenario de dañosa partir del Iv_2 (modificado) aplicando una I= VII en terrenos duros y una I= VIII en terrenos de dureza media y blanda. El resultado (Fig. 13) es un escenario muy similar al del terremoto del 11-5-2011 (Fig. 3), en el que hay una zona de menor intensidad en la parte Este de la ciudad (y por tanto con menor grado de daño), mientras que en el resto (terrenos de dureza media–blanda correspondientes a zonas de depósitos aluviales y coluviales) la intensidad es VIII y los daños mayores.

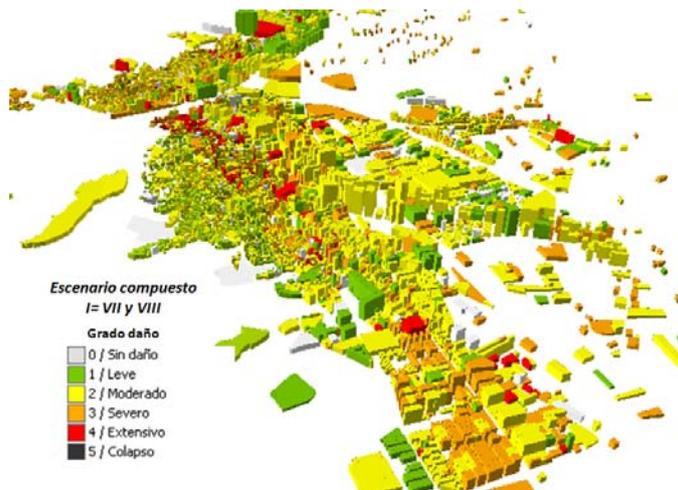


Figura 13 – EDS obtenido a partir de Iv_2 y de los escenarios de I= VII y VIII. (EDS made from Iv_2 and I= VII / VIII scenarios).

5. CONCLUSIONES

Un 80% de los edificios resultaron afectados, de los que 1.164 tuvieron daños graves y 329 de ellos tuvieron que demolerse.

Causas relevantes de los daños: corta distancia epicentral, directividad, valores altos del movimiento del terreno, contenido en frecuencia de la respuesta del terreno, defectos estructurales y no estructurales.

Los edificios de mayor daño fueron los construidos antes de 1961 (~200 edificios demolidos y ~300 con daños graves). También destacan los construidos entre 1977 y 1996, con 62 edificios demolidos y 51 con daños graves.

En los edificios de Hormigón Armado ha influido la existencia de pisos débiles o de pilares cortos.

En las estructuras murarias y en las patrimoniales han influido la excesiva rigidez y sus cambios espaciales, la falta de conexión entre elementos verticales y horizontales y el estado de conservación.

La existencia de un precursor modificó la vulnerabilidad.

La vulnerabilidad y los EDS virtuales usando el Método Risk-UE, (IV modificado y sin modificar) se han evaluado en SIG.

Los factores modificadores de comportamiento y regionales aplicados para Iv son los deducidos para Granada.

Los EDS con Iv sin modificar dan un escenario similar al observado para I = VIII.

El escenario que mejor se ajusta al observado es el que contempla una I = VII en la zona con terrenos duros y el resto con I = VIII en las zonas de terrenos blandos.

Los análisis ex-ante de vulnerabilidad y de escenarios de daños sísmicos dan una visión aproximada del riesgo sísmico a escala local suficiente para la toma de medidas correctoras.

Los análisis ex-post sirven para probar y ajustar las matrices de probabilidad de daño y para identificar áreas con posibles intensidades diferentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestra sincera gratitud a todas aquellas personas que nos han ayudado durante la inspección de edificios en Lorca, especialmente a arquitectos, ingenieros y técnicos locales de Protection Civil de Lorca. Asimismo, queremos resaltar que este trabajo de investigación se ha realizado dentro del marco de los proyectos de investigación CGL2007-66745-C02-01-02/BTE y CGL2011-30187-C02-01-02 subvencionados por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

6. REFERENCIAS

Alguacil, G., Vidal F., Navarro, M., García-Jerez, A., Pérez-Muelas, J. (2012). Characterization of earthquake shaking severity in the town of Lorca during the May 11, 2011 event. Bulletin of Earthquake Engineering (en revisión). 15pp.
Benito, B., et al. (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.

- Bernardini, A. (2000), "The vulnerability of buildings - Evaluation on the national scale of the seismic vulnerability of ordinary buildings", CNR-GNDT, Rome.
- Corsanego, A. y Petrini, V. (1994), "Evaluation of criteria of seismic vulnerability of the existing building patrimony on the national territory.", *Seismic Engineering*, Vol. 1 Patron Ed., pp. 76-106
- Donaire-Avila J., Benavent-Climent A., Escobedo A., Feriche M., Oliver-Saiz E., Ramírez-Márquez A.L. (2012). Damage assessment on building structures subjected to the recent near-fault earthquake in Lorca (Spain). *15WCEE Lisboa (Portugal)*, 24-28 sept. 2012.
- Eurocode No.8 (1998). Design of structures for earthquake resistance. Commission of the European Communities. Doc CEN/TC250/SC8/N335,
- García-Mayordomo, J., Martínez-Díaz, J.J. (2006). Caracterización sísmica del Anticlinalorio del Bajo Segura (Alicante): Fallas del Bajo Segura, Torrevieja y San Miguel de Salinas. *Geogaceta* 40: 19-22
- Giovinazzi, S., (2005), "The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis", Tesis Doctoral, Technical University of Braunschweig. Alemania, 300 pp.
- Giovinazzi, S. y Lagomarsino, L., (2002), "A methodology for the vulnerability analysis of built-up areas", *Proceedings of the International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction*, Bucharest, DVD-Rom
- Giovinazzi, S. y Lagomarsino, S. (2004), "A macroseismic method for vulnerability assessment of buildings", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper ID 896.
- Giovinazzi, S. (2005). The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. Tesis doctoral. The Department of Civil Engineering of the Technical University Carolo-Wilhelmina at Brannschweig, and The Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence. Florence, Italy. 200 pp.
- HAZUS (1999). Earthquake loss estimation methodology. Federal Emergency Management Agency, FEMA (1999).
- Instituto Andaluz de Geofísica (IAG) (2011). Terremoto Lorca (11 Mayo 2011), estudios preliminares, Granada, Spain. (Available at <http://www.ugr.es/iag/>.)
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1992). Estudio de la peligrosidad y vulnerabilidad sísmica en Lorca y su término municipal. Ed.: IGME and Murcia Government. 197 pp.
- López-Comino J.A., Mancilla F.L, Morales J., Stich D. (2012). Rupture directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca earthquake (Spain). *Geophysical Research Letters*. 15 pp.
- Milutinovic, Z. V. y Trendafiloski, G. S. (2003). WP04. Vulnerability of current buildings. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. 109 pp.
- Navarro M., García-Jerez A., Alcalá F.J., Vidal F., Enomoto T. (2012) Local Site Effect Microzonation of Lorca town (southern Spain). *Bull. Earthquake Engineering* (en revisión)
- Risk-UE (2003). An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns. European Commission 5FP - City of Tomorrow and Cultural Heritage. CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-00014. Duration: 44 Months (15/01/2001-30/09/2004).
- Sandi H., y Floricel I., (1995), "Analysis of seismic risk affecting the existing building stock", *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, pp 1105-1110.
- Wald, D. J., V. Quitoriano, T. H. Heaton, and H. Kanamori (1999) Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity and modified Mercalli intensity in California, *Earthq Spectra*, 15, 557–564