

EVALUACIÓN DE LOS MODIFICADORES POR COMPORTAMIENTO URBANOS QUE AFECTAN AL DAÑO EN LOS TERREMOTOS. APLICACIÓN AL TERREMOTO DE LORCA

Martínez-Cuevas, S. ^{1*}; Morillo Balsera, M.C. ¹, Cervera Bravo, J. ¹; Benito Oterino, B. ¹; San Millán Escribano, M. ²; Gaspar-Escribano, J. ¹; Torres Fernández, Y. ¹

¹ *Universidad Politécnica de Madrid. UPM*

² *Escuela de diseño, innovación y tecnología de Madrid. ESNE*

sandra.mcuevas@upm.es

Resumen

Habitualmente, la estimación de la vulnerabilidad sísmica se centra en el comportamiento estructural de los edificios. Sólo algunas metodologías, como el proyecto Risk-UE, consideran la influencia de otros factores no estructurales o urbanísticos, tales como el piso blando, la irregularidad en alzado, la irregularidad en planta, etc. Estos factores, denominados también modificadores por comportamiento, pueden tener una incidencia en el daño observado, y la confluencia de varios de ellos puede variar sustancialmente la vulnerabilidad.

Los modificadores por comportamiento se han identificado de forma empírica, a través de la observación de patrones de daño típicos en terremotos, teniendo en cuenta las inspecciones visuales (ATC 21 1988, Benedetti y Petrini 1984, UNDP/UNIDO 1985) y otras propuestas (Coburn y Spence 1992). La puntuación del modificador ha sido dada por el conocimiento de expertos en terremotos tras analizar evaluaciones de vulnerabilidad anteriores y bases de datos del daño producido en edificios.

En esta comunicación estudiaremos los modificadores que derivan de características urbanísticas. Esta línea de investigación considera que un parámetro modificador deriva de características urbanísticas si puede ser regulado en la Normativa Urbanística de un Plan General de Ordenación Urbana. Se realiza una descripción de cada modificador según cada metodología o investigador (Risk-UE, Giovinazzi, Lantada y Feriche) y una comparativa entre las distintas ponderaciones de los modificadores. Este análisis nos permite poder tener una primera visión de la posible cuantificación de cada modificador y la tendencia que ha tenido la calibración desde el año 2003 con el proyecto Risk-UE hasta el año 2012 con la tesis de Feriche.

Finalmente se presentan los resultados del estudio exploratorio de los parámetros urbanísticos de tres zonas seleccionados de la ciudad de Lorca según el tipo de suelo en el que se encuentren y se indican aquellos parámetros que han podido influir en el daño provocado por el terremoto de mayo de 2011.

Palabras clave: *modificadores por comportamiento, vulnerabilidad, daño, urbanismo.*

"El trabajo presentado se ha desarrollado en el marco del proyecto MERISUR, referencia CGL2013-40492-R, financiado por el Programa Estatal de I+D+I orientado a los Retos de la Sociedad del Ministerio de Economía y Competitividad."

1. Introducción

La vía analítica más importante desarrollada desde principios del siglo XX para reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones ha sido la Ingeniería Sismorresistente (ISR) o Ingeniería Sísmica. Bertero la define como *"la rama de la ingeniería dedicada a la mitigación de los efectos de los sismos"*. Esta ingeniería se encarga de estudiar el comportamiento de las construcciones (edificios, puentes, presas de embalse y otros) ante acciones sísmicas y de buscar soluciones para mejorar la resistencia ante dichas acciones, reduciendo con ello su vulnerabilidad. Desde mediados del siglo XX el estado de conocimiento sobre el comportamiento de las estructuras ante los sismos ha avanzado notablemente, con el consiguiente impulso en esta rama de la ingeniería.

Dentro de la Ingeniería Sísmica podemos encontrar numerosas y variadas metodologías y técnicas propuestas por diferentes autores para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, basadas principalmente en el estudio del desempeño sísmico de las edificaciones según su estructura y construcción. Entre estas metodologías destacan los métodos empíricos y los métodos analíticos o teóricos.

Todas las metodologías analizan por un lado la vulnerabilidad de las edificaciones a través de índices o clases de vulnerabilidad y por otro lado el grado de daño que pueden sufrir en función de los movimientos sísmicos. La mayoría de las metodologías conocidas estudian los elementos estructurales y constructivos de las edificaciones, dejando en un segundo plano sus características urbanísticas, que suelen ser denominadas modificadores de la vulnerabilidad. En esta línea de investigación, se describen, cuantifican y clasifican estos modificadores por comportamiento que pueden variar la vulnerabilidad de una edificación.

Los métodos empíricos están basados en la experiencia sobre el comportamiento de tipos de edificaciones durante sismos y la caracterización de deficiencias sísmicas potenciales. En estos métodos, se asignan clases de vulnerabilidad a cada tipología constructiva, en una cierta escala que puede ser cualitativa o numérica. Un ejemplo de la primera es la clasificación de vulnerabilidad propuesta en la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1998), según la cual se adoptan clases de la A (más vulnerable) a la F (menos vulnerable), atendiendo a la experiencia sobre el desempeño sísmico que han tenido estructuras similares ante terremotos relevantes. Otro ejemplo de valoración cuantitativa es la basada en el índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1984; Yepez, 1996), según el cual se asigna un índice numérico a cada edificación tras su inspección, identificando deficiencias sísmicas potenciales y caracterizando las mismas atribuyendo un valor a cada componente del sistema, que ponderado en función de su importancia relativa, conduce a la determinación final de un índice de vulnerabilidad.

Los métodos analíticos en cambio, evalúan la resistencia de las estructuras a los movimientos del terreno utilizando como base modelos mecánicos de respuesta estructural e involucrando como datos las características mecánicas de las estructuras. Un ejemplo de esta metodología es la desarrollada en el proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), que es un proyecto europeo, para evaluar la vulnerabilidad y la fragilidad de los edificios residenciales de la ciudad. Otro ejemplos son la metodología incluida en el programa HAZUS (FEMA/NIBS, 1999) aplicable a Estados Unidos, desarrollado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA), junto con el National Institute of Buildings Sciences, NIBS (NIBS, 2000), el programa EQRM (Robinson et al., 2006) y SELINA (Molina et. al., 2010).

Algunas de estas metodologías mencionadas tienen en cuenta modificadores por comportamiento que pueden estar regulados en las normas urbanísticas de un Plan General. En el proyecto del índice de vulnerabilidad de Benedetti y Petrini, se da un valor a la configuración en planta y elevación de las edificaciones y en el proyecto Risk UE existen modificadores del índice de vulnerabilidad en función de la regularidad de la planta del edificio y la posición de la edificación (terminal, esquina e intermedio).

La importancia de identificar estos modificadores urbanos lo pone de manifiesto la arquitecta Teresa Guevara en su libro “Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas” (Universidad Central de Venezuela, Caracas, Marzo 2012), donde la arquitecta analiza la vulnerabilidad sísmica de la ciudad contemporánea. Realiza un estudio de las configuraciones urbanas y arquitectónicas que influyen en la generación de vulnerabilidad en la ciudad contemporánea y en el comportamiento sismorresistente de los edificios. Identifica los siguientes parámetros urbanísticos como generadores de esta vulnerabilidad urbana: el edificio singular colindante con edificaciones, la irregularidad geométrica en alzado, la irregularidad geométrica en planta, el piso blando y el piso débil, la columna cautiva y la columna corta, el muro urbano.....). Guevara pone de manifiesto la importancia de estos parámetros, que pueden aumentar o disminuir la vulnerabilidad de las ciudades, tras el estudio del comportamiento de conjuntos de edificaciones en terremotos recientes.

2. Metodología

A pesar de la importancia que tiene la ordenación del territorio y el planeamiento urbanístico en zonas de riesgo sísmico, los parámetros urbanísticos que afectan a la vulnerabilidad de las edificaciones no han sido objeto de especial atención por parte de los investigadores. Todos los estudios e iniciativas conocidos internacionalmente, realizan un estudio exhaustivo sobre el comportamiento estructural y constructivo de las edificaciones, considerando el edificio como un elemento individual de la ciudad. Sin embargo, algunas iniciativas internacionales como el índice de vulnerabilidad italiano, la EMS-98 y el proyecto Risk-UE, consciente de la importancia de este hecho, han ponderado parámetros urbanísticos, aumentando o disminuyendo de esta manera la vulnerabilidad final del edificio.

La presente metodología va a describir y analizar la evaluación de la vulnerabilidad que realizan las metodologías más conocidas y usadas en Europa posteriores al proyecto Risk-

UE, centrando el estudio en el análisis de los modificadores por comportamiento que clasifican y prestando especial atención en los que tienen características urbanísticas, estudiando sus definiciones y su ponderación.

Las líneas de investigación analizadas son el proyecto Risk-UE y las tesis doctorales de Sonia Giovinazzi (2005), Nieves Lantada (2007) y Mercedes Feriche (2012). Se van a describir los modificadores de cada uno de estos proyectos y se van a comparar con los modificadores del proyecto RISK-UE.

Una vez definidos y analizados estos modificadores se va a realizar un análisis exploratorio en tres zonas de la ciudad de Lorca seleccionadas con los daños producidos (Lorca 2011) en las edificaciones y la frecuencia de los modificadores en cada edificio, separando la tipología constructiva y el tipo de suelo en el que se encuentran.

2.1. Clasificación y cuantificación de los modificadores por comportamiento, Mc

2.1.1. Proyecto Risk-UE

El Proyecto Risk-UE es un proyecto financiado con fondos comunitarios que pretende desarrollar una propuesta avanzada sobre los escenarios de riesgo de terremoto para su posible aplicación en distintas ciudades europeas. El principal objetivo de Risk-UE era proponer métodos avanzados de análisis de riesgo sísmico que permitieran incorporar las características de los edificios, del patrimonio cultural y de las sociedades urbanas típicas de Europa. Risk-UE desarrolla y aplica metodologías homogéneas y avanzadas para el estudio de la amenaza, de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en áreas urbanas europeas.

El módulo WP4: "*Estudio de la vulnerabilidad de los edificios actuales*" propone dos metodologías para evaluar la vulnerabilidad y la fragilidad de los edificios residenciales de la ciudad. La primera metodología se basa en el método del índice de vulnerabilidad; la segunda en espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

La metodología del índice de vulnerabilidad (MIV), llamado en Risk UE de Nivel I, clasifica el parque inmobiliario de la ciudad en clases de vulnerabilidad, para después realizar un análisis de vulnerabilidad de cada edificio individual. La acción sísmica se considera en términos de intensidad macrosísmica EMS-98.

La matriz de clasificación de edificios (*Building Typology Matrix*, BTM) incluida en el WP4 sintetiza las diferentes características del inventario de edificios construidos en los países europeos participantes en el proyecto Risk-UE: Bulgaria, Grecia, Francia, Italia, FYRoM (Antigua República Yugoslava de Macedonia; en inglés Former Yugoslav Republic of Macedonia), Rumania y España.

La BTM del Risk- contiene 23 clases de edificios (10 de mampostería, 7 de hormigón armado, 5 de estructura metálica y 1 con estructura de madera), agrupados por su tipología estructural y material de construcción.

RISK-UE propone índices de vulnerabilidad específicos para su BTM considerando, para cada tipo de edificio hasta 4 índices con funciones de pertenencia χ definidas mediante los

siguientes rangos: el más probable ($\chi=1$), el posible o plausible ($\chi=0.6$) y el menos probable ($\chi=0.2$).

Milutinovic y Trendafiloski (2003) proporcionan una serie de directrices para la modificación de los índices de vulnerabilidad de cada edificio mediante la suma de valores de penalización o de mejora, basados en la propuesta de la ATC-21 y la National Group for Defense from Earquake (GNDT) atendiendo, tanto a la calidad y cantidad de la información disponibles, como a las características específicas de los edificios analizados. El índice de vulnerabilidad característico de cada edificio en particular, $V_{I-\text{edificio}}$, se evalúa según la siguiente ecuación (Feriche, 2012):

$$\bar{I}_{v-\text{edificio}} = I_{v-\text{clase}} + \Delta M_R + \sum_{j=1}^n M_{Cj}$$

donde se modifica el índice de vulnerabilidad básico de la clase a la que pertenece el edificio ($I_{v-\text{clase}}$) sumando un modificador regional, ΔM_R , y una serie de modificadores por comportamiento M_{Cj} .

Las características particulares de cada edificio se tienen en cuenta en los modificadores por comportamiento del índice básico de la clase a la que pertenece el edificio. El modificador por comportamiento es la suma de modificadores parciales M_{Cj} . Estos modificadores permite tener en cuenta factores urbanísticos que califican la situación relativa del edificio dentro de una manzana, bloque o conjunto del edificio del que forma parte y con los que está unido formando una manzana o agregados de edificios. Además de estos aspectos, también se tienen en cuenta modificadores como el número de pisos, la irregularidad en altura, la irregularidad en planta, la longitud en fachada y el estado de conservación, alguno de los cuales de ellos se pueden también regular en las normas urbanísticas.

El proyecto Risk_UE realiza una clasificación de los modificadores por comportamiento según la tipología estructural del edificio al que pertenecen (mampostería – hormigón armado). La Tabla 1 contiene los modificadores de comportamiento para edificios de hormigón armado cuantificándolos según el nivel de diseño sismorresistente, código de nivel bajo, código de nivel medio y código de nivel alto.

Tabla 1. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad I_v para edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

FACTORES DE COMPORTAMIENTO		Puntuaciones M_{Cj} según el nivel de diseño sismorresistente		
		Código de nivel bajo (Pre or Low code)	Código de nivel medio (Medium code)	Código de nivel alto (High code)
Nivel de código		+0.16	0	-0.16
Mantenimiento deficiente		+0.04	+0.02	0
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 3)	-0.04	-0.04	-0.04
	Medio (4 o 7)	0	0	0
	Alto (8 o ...)	+0.08	+0.06	+0.04

Evaluación de los modificadores por comportamiento que afectan al daño en los terremotos. Aplicación al terremoto de Lorca

Sandra Martínez Cuevas
sandra.mcuevas@gmail.com

	más)			
Irregularidad en planta	Forma	+0.04	+0.02	0
	Torsión	+0.02	+0.01	0
Irregularidad vertical		+0.04	+0.02	0
Columna corta		+0.02	+0.01	0
Ventanas en arco		+0.04	+0.02	0
Edificios en agregado (con juntas de dilatación insuficientes)		+0.04	0	0
Cimientos	Zunchos	-0.04	0	0
	Zapatas corridas	0	0	0
	Zapatas aisladas	+0.04	0	0
Morfología del terreno	Pendiente	+0.02	+0.02	+0.02
	Precipicio o acantilado	+0.04	+0.04	+0.04

Se ha marcado en naranja los modificadores por comportamiento que tienen características urbanísticas.

En edificios de mampostería no reforzada la mayor penalización es para los edificios con altura superior a 6 plantas y los edificios en posición terminal dentro de una manzana, su puntuación es de +0.06. Los modificadores que disminuyen la vulnerabilidad de un edificio al tener valores negativos son: edificios con altura de uno a dos plantas y edificios adyacentes de altura superior, en ambos casos el valor del modificador es de -0.02.

En edificios de hormigón armado, la mayor penalización se da para edificios de código de nivel bajo con altura superior a 8 plantas, +0.08 y la reducción del índice de vulnerabilidad en edificios de una a tres plantas para los tres niveles de código, bajo, medio y alto, -0.04.

Como puede observarse la puntuación del modificador varía en el rango $\pm 0,02$. Esta jerarquía se mantendrá en todos los estudios posteriores.

2.1.2. Desarrollos posteriores a Risk UE

- **Giovinnazzi (2005)**

Sonia Giovinnazzi (2005) propuso una calibración de los modificadores del proyecto Risk-UE de acuerdo a los factores que afectan a la vulnerabilidad de los edificios (Tabla 2). La descripción de los modificadores por comportamiento es la misma que la descrita en el proyecto Risk-UE, los cambios se realizaron en la ponderación de los modificadores. Estas variaciones son:

- los edificios de mampostería sufren una penalización en el parámetro altura de la edificación, los edificios de 1 a 2 alturas y los de 3 a 5 disminuyen su vulnerabilidad, de -0.02 en Risk-UE a -0,08 y de +0.02 en Risk-UE a 0 respectivamente. Los de más de 6 alturas aumentan su vulnerabilidad de +0.06 en Risk-UE a +0.08.

- en los edificios de hormigón armado se modifica la ponderación para código bajo o medio de DSR (diseño sismorresistente) en alturas entre 1 y 3 pisos y alturas superiores a 8 pisos, en ambos casos el valor del modificador es inferior. Giovinnazzi considera que en los edificios de hormigón armado no se debe penalizar tanto la altura del edificio como en los edificios de mampostería.
- El factor piso blando y morfología del terreno Giovinnazzi no los valora.

Tabla 2. Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Giovinnazzi, 2005).

FACTORES DE COMPORTAMIENTO	MAMPOSTERÍA		HORMIGÓN ARMADO			
			Pre or Low code	Medium code	High code	
	M_C	M_C	M_C	M_C	M_C	
Estado de conservación	Bu Buen mantenimiento	- 0.04	BueBuen mantenimiento	-	-	-
	MalMal mantenimiento	+0.04	Mal Mal mantenimiento	+0.04	+0.02	0
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.08	Bajo (1 o 3)	-0.02	-0.02	-0.02
	Medio (3, 4 o 5)	0	Medio (4 a 7)	0	0	0
	Alto (6 o más)	+0.08	Alto (8 o más)	-0.04	-0.04	-0.04
Sistema estructural	Grosor de los muros	-				
	Distancia entre muros	0.04				
	Atado de muros	++0.04				
	Conexión forjado-muros					
Irregularidad en planta	Forma	+0.04	Forma	-0.04	-0.02	0
	Torsión		Torsión	+0.02	+0.01	0
Irregularidad vertical	Torsión	+0.04	Torsión	+0.04	+0.02	0
	Forma		Forma			
Plantas superpuestas		+0.04				
Cubierta	Peso y empuje de la cubierta	+0.04				
	Conexiones con la cubierta					
Intervenciones	Reparaciones	-0.08÷ +0.08				
Elementos antisísmicos	Barbacanas, arbotantes, contrafuertes	- 0.04				
Edificio en agregado: posición en planta	Intermedio	- 0.04	con juntas de dilatación insuficientes			
	Esquina	+0.04		+0.04	+0.02	0
	Terminal	+0.06				
Edificio en agregado: posición en elevación	Plantas escalonadas	+0.04				
	Edificios adyacentes de diferente altura	-0.04÷ +0.04				
Cimientos	Cimientos diferentes niveles	+0.04	Zunchos	-0.04	0	0
			Zapatas corridas	0	0	0
			Zapatas aisladas	+0.04	0	0
Morfología del terreno						
Columna corta			+0.02	+0.01	0	
Ventanas en arco			+0.04	+0.02	0	

• Lantada (2007)

En el año 2007, Nieves Lantada en su tesis doctoral evaluó el riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona. Realizó la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios con el método empírico y con el método analítico. En el método empírico realizó una tabla con los valores de los modificadores por comportamiento de acuerdo a las tipologías constructivas de mampostería y de hormigón armado (Tabla 3). Al evaluar los modificadores, Lantada realizó modificaciones respecto a los estudios anteriores tanto en la descripción de los modificadores como en la cuantificación. Al insertar todos los datos en un GIS para poder luego cuantificarlos de forma automática, Lantada realizó modificaciones en la descripción de los modificadores. En la valoración de los modificadores se tuvieron en cuenta las técnicas actuales de construcción en Barcelona, las tipologías estructurales existentes y la evolución de las distintas normas sismorresistentes.

Tabla 3. Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Lantada, 2007).

FACTORES DE COMPORTAMIENTO	MAMPOSTERÍA		HORMIGÓN ARMADO		
			Pre or Low code	Medium code	
		M_C	M_C	M_C	
Estado de conservación	Buc Buen mantenimiento	- 0.04	Bue Buen mantenimiento	-0.04	-0.04
	Mal Mal mantenimiento	+0.04	Mal Mal mantenimiento	+0.04	+0.04
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.02(≤ 1940) -0.04(> 1940)	Bajo (1 o 3)	-0.04	-
	Medio (3, 4 o 5)	-0.02(≤ 1940) 0(> 1940)	Medio (4 a 7)	0	-
	Alto (6 o más)	+0.06(≤ 1940) +0.04(> 1940)	Alto (8 o más)	+0.08	-
Sistema estructural					
Irregularidad en planta	RC < 0.5	+0.04	RC < 0.5	+0.04	+0.04
	0.5 > RC < 0.7	+0.02	0.5 > RC < 0.7	+0.02	+0.02
Irregularidad vertical	$1 < \delta \leq 3$	+0.02	$1 < \delta \leq 3$	+0.02	+0.02
	$\delta > 3$	+0.04	$\delta > 3$	+0.04	+0.04
Plantas superpuestas					
Cubierta	Peso y empuje de la cubierta Conexiones con la cubierta	+0.04			
Intervenciones	Reparaciones	-0.08 ÷ +0.08			
Elementos antisísmicos					
Edificio en agregado: posición en planta	Intermedio	-	Intermedio	-0.04	-0.04
	Esquina	+0.04	Esquina	+0.04	+0.04
	Terminal	+0.06	Terminal	+0.06	+0.06
Edificio en agregado: posición en elevación	E. A. misma altura	0.00	E. A. misma altura	0.00	0.00
	Un E.A. misma altura y otro más bajo	+0.02	Un E.A. misma altura y otro más bajo	+0.02	+0.02
	E.A. más bajos	+0.04	E.A. más bajos	+0.04	+0.04
	Un E.A. misma altura y otro más alto	-0.02	Un E.A. misma altura y otro más alto	-0.02	-0.02
	E.A. más altos	-0.04	E.A. más altos	-0.04	-0.04

Evaluación de los modificadores por comportamiento que afectan al daño en los terremotos. Aplicación al terremoto de Lorca

Sandra Martínez Cuevas
sandra.mcuevas@gmail.com

Cimientos		
Morfología del terreno		
Piso Blando (Soft-story)		
Columna corta		
Ventanas en arco		
Longitud de fachada	+0.04 (L=30)	
	+0.013 (L=20)	

- **Ferliche (2012)**

Recientemente, Ferliche (2012) presentó su tesis doctoral “Elaboración de Escenarios de daños sísmicos en la ciudad de Granada”. Ferliche conocía la tesis doctoral de Lantada, por lo que la mayoría de los modificadores por comportamiento los cuantificó igual pero adaptándose a las tipologías constructivas y estructurales de Granada (Tabla 4). Además, tras el reciente terremoto de Lorca de 2011, adaptó muchos de estos modificadores a los daños que habían sufrido las edificaciones en ese terremoto.

Tabla 4. Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Ferliche, 2012).

FACTORES DE COMPORTAMIENTO	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO		
		M _C	Pre or Low code	Medium code
			M _C	M _C
Estado de conservación	Buen mantenimiento -0.04(rehab) 0 (>1925)	Buen mantenimiento	0	0
	Mal mantenimiento +0.04 (≤1925)	Mal mantenimiento	+0.02 (>1996)	
	Ruina +0.06	Ruina	+0.04 (≤1996)	
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2) -0.02(≤1925) -0.04(>1925)	Bajo (1 o 3)	-0.04	-0.04
	Medio (3, 4 o 5) -0.02(≤1925) 0(>1925)	Medio (4 a 7)	0	0
	Alto (6 o más) +0.06	Alto (8 o más)	+0.08	+0.06
Sistema estructural	Grosor de los muros Distancia entre muros +0.04(≤1925) 0(>1925) Atado de muros -0.04 (rehabil) Conexión forjado-muros			
Irregularidad en planta	RC < 0.5 +0.04	RC < 0.5	+0.04	+0.04
	0.5 > RC < 0.7 +0.02	0.5 > RC < 0.7	+0.02	+0.02
Irregularidad vertical	+0.02		+0.06	+0.06
Plantas superpuestas				
Cubierta	Peso y empuje de la cubierta Conexiones con la cubierta +0.04			
Intervenciones				
Elementos antisísmicos		Con juntas antisísmicas insuficientes	+0.04	0
Edificio en agregado: posición en planta	Intermedio -0.04	Intermedio	-0.04	-0.04
	Esquina +0.04	Esquina	+0.04	+0.04
	Terminal +0.06	Terminal	+0.06	+0.06
Edificio en agregado:	E. A. misma altura 0.00	E. A. misma altura	0.00	0.00

Evaluación de los modificadores por comportamiento que afectan al daño en los terremotos. Aplicación al terremoto de Lorca

posición en elevación	Un E.A. misma altura y otro más bajo	+0.02	Un E.A. misma altura y otro más bajo	+0.02	+0.02
	E.A. más bajos	+0.04	E.A. más bajos	+0.04	+0.04
	Un E.A. misma altura y otro más alto	-0.02	Un E.A. misma altura y otro más alto	-0.02	-0.02
	E.A. más altos	-0.04	E.A. más altos	-0.04	-0.04
Cimientos					
Morfología del terreno	Pendiente	+0.04	Pendiente	+0.04	+0.04
	Precipicio	+0.04	Precipicio	+0.04	+0.04
Piso Blando (Soft-story)		+0.04		+0.06	+0.06
Columna corta				+0.08	+0.08
Ventanas en arco					
Longitud de fachada		+0.04 (L=30)			
		+0.013 (L=20)			

Los modificadores por número de plantas (excepto en el año 1925), por irregularidad en planta, por diferencia de altura con los colindantes y por posición del edificio en la manzana tienen la misma clasificación, cuantificación y descripción que Lantada (2007).

2.2. Análisis comparativo de los distintos valores propuestos para modificadores por comportamiento en tipologías de mampostería no reforzada y hormigón armado

Tras analizar la cuantificación de los modificadores por cada uno de los expertos relacionados con los parámetros urbanísticos, se han realizado unos gráficos comparativos de las cuatro propuestas (Risk-UE, Giovinazzi, Lantada y Feriche). Este análisis nos permite poder tener una primera visión de la posible cuantificación de cada modificador y la tendencia que ha tenido la calibración desde el año 2003 con el proyecto Risk-UE hasta el año 2012 con la tesis de Feriche. Esta ponderación está relacionada con los daños evaluados por los expertos en diferentes terremotos y por el conocimiento de la construcción y urbanización de las ciudades donde se aplica.

- En todas las metodologías el valor de los modificadores por comportamiento varía en rangos de valor entre ± 0.02 .
- Los modificadores en la tipología estructural de hormigón armado (Figura 1) se clasifican en dos categorías “*pre or low code*” y “*medium code*”. En el parámetro altura de la edificación, en ambas categorías, Giovinazzi premia respecto a las otras metodologías a los edificios de 1 a 3 plantas y a los edificios con altura superior a 8 plantas. Feriche calibra los modificadores por comportamiento de acuerdo a los daños que se produjeron en el terremoto de Lorca, penaliza principalmente dos parámetros en los edificios de hormigón armado, el parámetro columna corta, al ser el principal causante del colapso del único edificio en Lorca, y el parámetro de piso blando, ambos con un valor de + 0.06.
- Como puede verse en la Figura 2, en los edificios de mampostería, en el parámetro altura o número de plantas Giovinazzi penaliza, respecto a las otras metodologías, a los edificios de más de seis alturas y premia a los edificios de 1 y 2 alturas. En la evaluación de parámetro irregularidad en planta Feriche y Lantada premian a las edificaciones de acuerdo a los valores de la razón de Compacidad/Circularidad (Compacness Ratio, RC) y

en la irregularidad en alzado Lantada define el parámetro δ que determinará el modificador a aplicar, también premiando a las edificaciones con valores $1 < \delta \leq 3$.

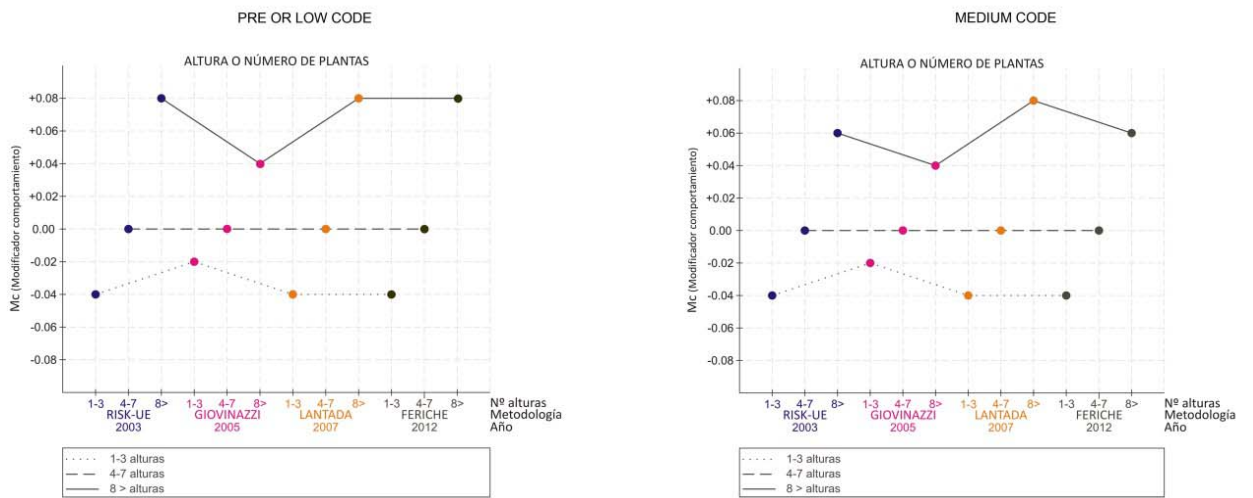


Figura 1. Análisis comparativo de la cuantificación de los modificadores por comportamiento en edificios de hormigón armado (Risk-UE 2003, Giovinnazzi 2005, Lantada 2007 y Feriche 2012).

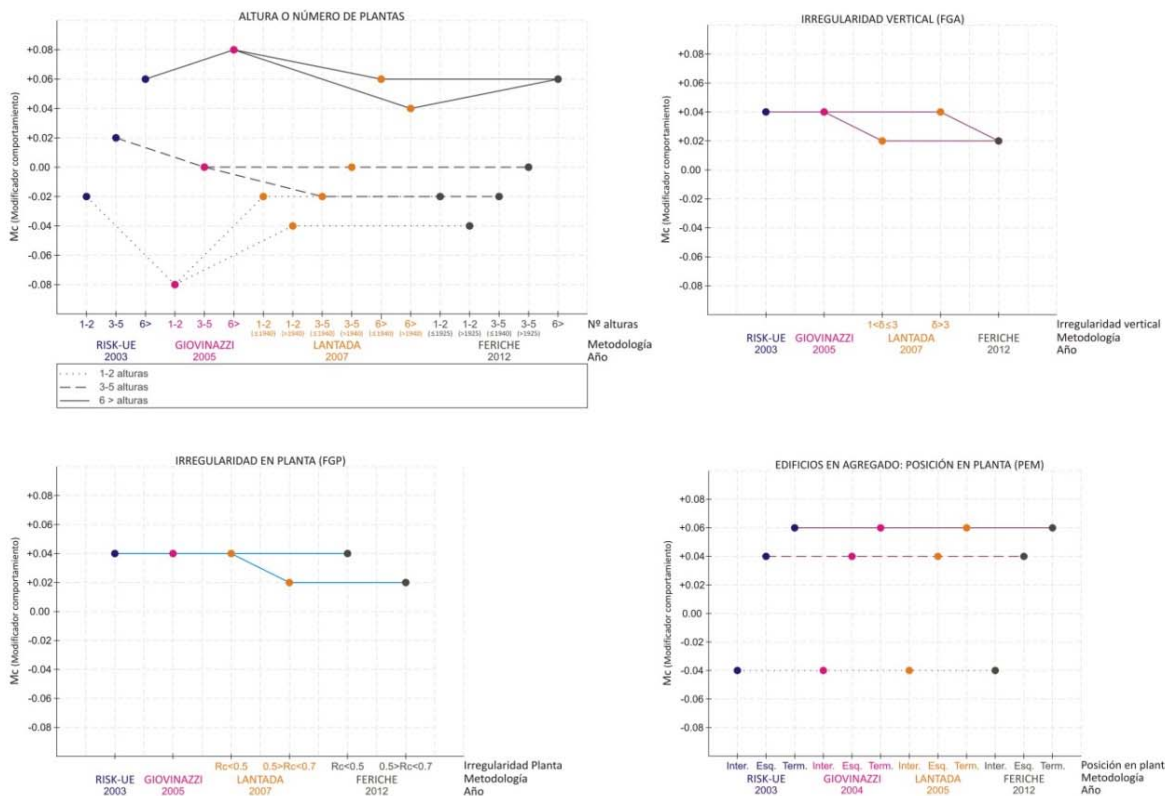


Figura 2. Análisis comparativo de la cuantificación de los modificadores por comportamiento en edificios de mampostería (Risk-UE 2003, Giovinnazzi 2005, Lantada 2007 y Feriche 2012).

2.3. Relación entre la Norma de edificación y Ordenanzas de Lorca y los modificadores por comportamiento urbanos

La Tabla 5 y la Tabla 6 muestra la relación entre los parámetros urbanísticos irregulares en zonas sísmicas, definidos por los modificadores por comportamiento urbanos, y las disposiciones de las Normas Urbanísticas. Como puede apreciarse el parámetro piso blando/débil se puede regular a través de tres aspectos normativos, uso, condiciones de volumen y condiciones estéticas, mientras que el parámetro pendiente no se tiene en cuenta en las ordenanzas, y como se sabe tras varios estudios de los daños que se producen en los terremotos, las zonas con pendientes pronunciadas pueden dar lugar a un tipo de construcción con pilares cortos que produce mucho daño en las edificaciones.

Esta primera aproximación entre ingeniería sísmica y planeamiento urbanístico nos va a permitir empezar a estudiar con más detenimiento cada uno de los parámetros urbanístico-sísmico que podremos definir y cuantificar en función de su relación con el daño en las edificaciones tras un terremoto. Esto nos ayudará a reducir la vulnerabilidad de las ciudades. En esta comunicación vamos a investigar estos parámetros en la ciudad de Lorca analizando los daños del terremoto del 11 de mayo de 2011.

Tabla 5. Relación entre los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente (modificadores por comportamiento urbanos) y objeto de estudio y las Ordenanzas Municipales del PGOU de Lorca (Tipología, Uso y Parcelación).

PARÁMETROS URBANÍSTICO	ORDENANZAS PGOU DE LORCA						
	TIPOLOGÍA	USOS			PARCELACIÓN		
		Característicos	Complementarios	Compatibles	Parcela mínima	Frente mínimo	Retranqueos mínimos
FGP							
FGA							
EFG							
DA							
PBF							
ECC							
TED							
PEM							
ALI							
PEL							
PTE							
ALT							

Tabla 6. Relación entre los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente (modificadores por comportamiento urbanos) y objeto de estudio y las Ordenanzas Municipales del PGOU de Lorca (Volumen, Condiciones de Volumen y Condiciones Estéticas).

PARÁMETROS URBANÍSTICO	ORDENANZAS PGOU DE LORCA						
	VOLUMEN			CONDICIONES DE VOLUMEN	CONDICIONES ESTÉTICAS		
	Fondo máximo	Altura máxima	Semisótano/ Sótano	Bajo cubierta/ Ático	Uso en planta baja	Cuerpo entrante/saliente	Cerramiento planta baja
FGP							
FGA							
EFG							
DA							
PBF							
ECC							
TED							
PEM							
ALI							
PEL							
PTE							
ALT							

2.3. Delimitación de las zonas de estudio en la ciudad de Lorca

Se han seleccionado tres zonas de estudio de la ciudad de Lorca representativa de los parámetros que queríamos analizar y de los daños que se produjeron en el terremoto a través de las ortofotos, del shapefile y de Google Earth. Se optó por tres zonas (Figura 3) que se consideró que reunían todas las tipologías edificatorias existentes en Lorca y que entre las tres formaban un tamaño de muestra lo suficientemente grande como para poder obtener unas conclusiones fiables. Dos zonas se encuentran en la parte norte de la localidad de Lorca (Barrio de San Diego, Barrios Altos y Barrio de Santiago), separadas por el río Guadalentín y la otra zona pertenece al Barrio de la Viña. En total es una muestra de 816 edificaciones.

La elección de las zonas de estudio se ha hecho de una forma aleatoria, teniendo en cuenta que el total de edificios ubicados en las tres zonas cumpla las siguientes características descritas en la línea metodológica, selección de la muestra.

- Todo los parámetros objeto de este trabajo están representados en la muestra en una cantidad mínima necesaria para garantizar la validez del estudio estadístico.
- La muestra tiene edificios con la clasificación completa del daño realizada en Lorca tras el terremoto en la evaluación rápida de daños (blanco, verde, amarillo, rojo y negro).
- Las zonas seleccionadas abarcan distintos tipos de suelo según la clasificación del suelo de la ciudad de Lorca (M. Navarro et al. 2012) según la distribución de valores Vs30 que propone el Eurocódigo EC8 (1998).

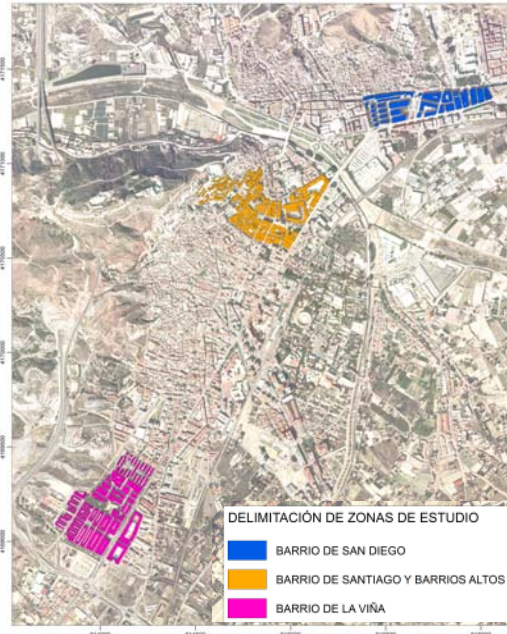


Figura 3. Situación de las edificaciones de las tres zonas seleccionadas en Lorca (Barrio de San Diego, Barrio de Santiago y barrios Altos y Barrio de la Viña.

2.3. Estudio exploratorio de los modificadores por comportamiento urbanos y el daño

El objetivo último del reconocimiento de emergencia es poder decidir qué edificaciones se pueden calificar como colapsadas u obviamente inseguras, y qué edificaciones pueden considerarse en condiciones aceptables de ser habitadas. Para ello se evalúa dentro del edificio su estado general, la existencia de daños en su estructura, y la existencia de daños en elementos no resistentes que pueden afectar a la habitabilidad del edificio o a la seguridad en sus inmediaciones.

En este estudio, se ha realizado la discriminación del factor daño de acuerdo a la clasificación de la habitabilidad, teniendo dos categorías: "No hay daño estructural/ Edificios Habitables" "sin daño (blanco) y daño no estructural (verde)" y "Con daño estructural/Edificios No Habitables" (Amarillo, Rojo y Negro).

Para poder comparar los daños es condición necesaria que se encuentre en la misma clase de suelo ya que según sea la clase de suelo la intensidad del terremoto puede verse disminuido o aumentado. Las zonas seleccionadas abarcan distintos tipos de suelo según la clasificación del suelo de la ciudad de Lorca (M. Navarro et al. 2012) según la distribución de valores V_s30 que propone el Eurocódigo EC8 (1998).

Con este tipo de estudios pretendemos tener un primer marco de referencia teórico sobre la relación del daño con los parámetros urbanísticos, e identificar en qué tipo de suelo y para qué tipología constructiva la cantidad de edificios, con un determinado parámetro urbanístico, con daño estructural es mayor que cuando no tiene daño estructural.

Se puede ver en el suelo de tipo C, es en los edificios de mampostería (Figura 4), en los parámetros urbanísticos FGA_3 (forma geométrica en alzado irregular voladizos abiertos),

DAD_2 (misma altura por la derecha), PB_1 (sin piso blando), PEL_1 (posición en elevación, edificios adyacentes misma altura) y ALT_1 (altura menor o igual a dos pisos) el número de edificios con daño estructural es superior al número de edificios que no tienen daño estructural.

En cambio, en el suelo de tipo B, es en los edificios de hormigón armado (Figura 5) , en los parámetros FGA_4 (forma geométrica irregular en alzado, entrante y saliente), PBD_3 (piso blando parcialmente cerrado), TED_1 (tipología edificatoria residencial colectiva, manzana cerrada con patio central) y ALT_2 (altura entre 2 y cuatro plantas) el número de edificios con daño estructural es superior a los edificios con daño no estructural, esto no ocurre en ningún parámetro urbanístico en los edificios de mampostería para este tipo de suelo.

Con este análisis inicial se podría indicar que en el suelo Tipo B, los edificios de hormigón armado con determinados parámetros urbanísticos han sufrido más daño estructural que los edificios de mampostería, sin embargo, en el tipo de suelo C, los edificios de mampostería han sufrido más daño que los edificios de hormigón armados con determinados parámetros urbanísticos.

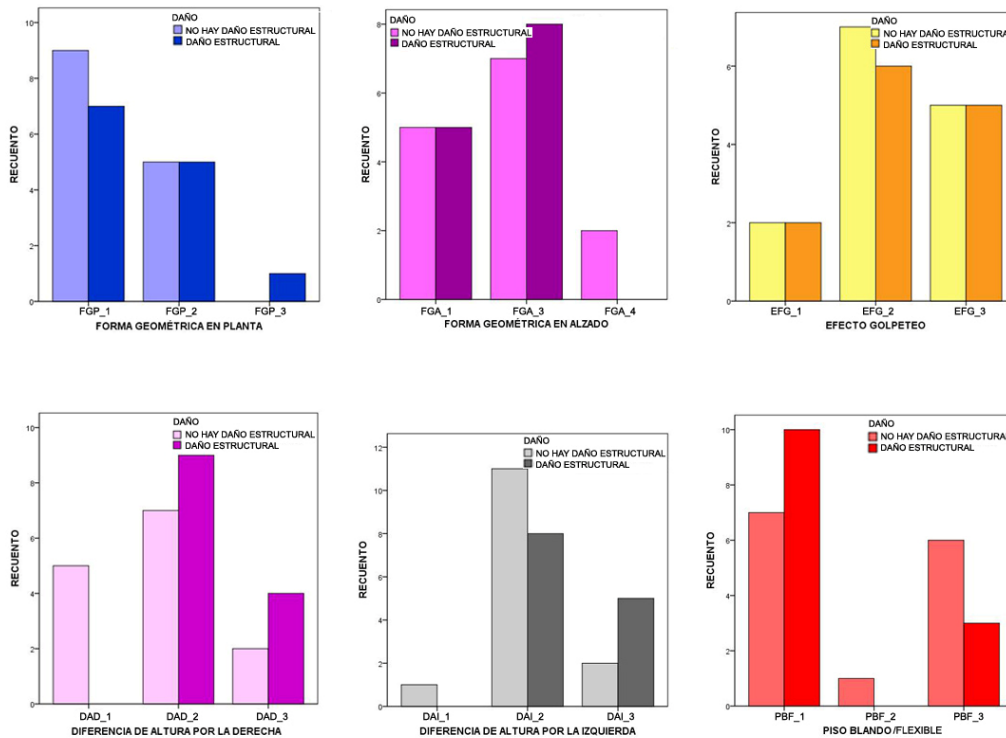


Figura 4. Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de mampostería en el tipo de suelo C.

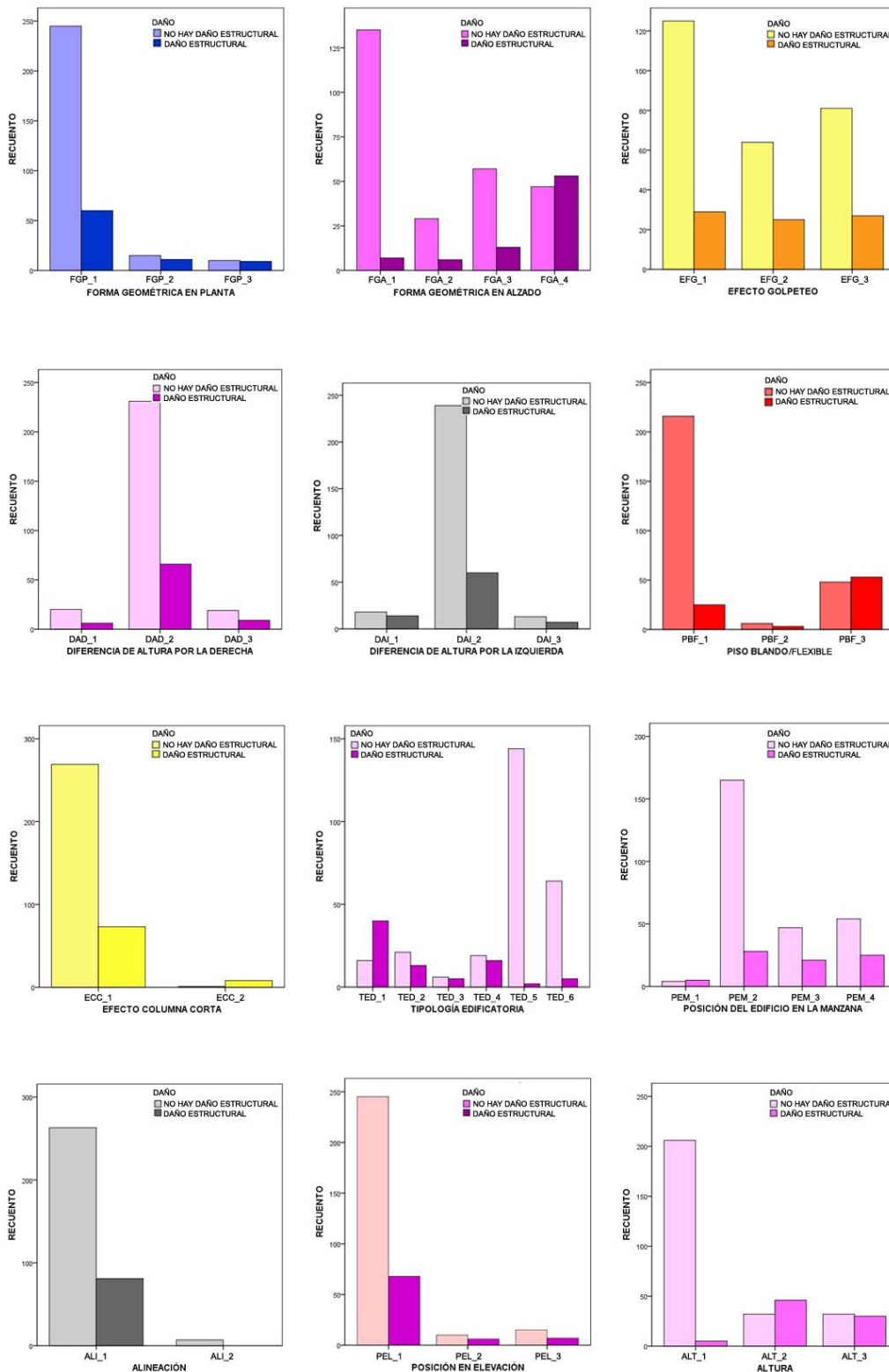


Figura 5. Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo B.

3. Resultados

En este trabajo se han expuesto las metodologías usadas para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las ciudades que permiten obtener y analizar escenarios de daño sísmico. Se ha profundizado en las metodologías empíricas, evaluando los modificadores por comportamiento que aumentan o disminuyen los índices básicos de vulnerabilidad según la tipología constructiva de los edificios. Además, el análisis del Planeamiento Urbanístico, profundizando en la Normativa, nos ha permitido determinar cuáles son los modificadores por comportamiento con carácter urbanístico.

La metodología propuesta se ha aplicado a cuatro barrios de Lorca, tres zonas de trabajo. La existencia de un buen conocimiento de los daños en Lorca tras el terremoto nos ha permitido realizar un estudio estadístico exhaustivo de cada nivel de los parámetros urbanísticos y su relación con el daño.

3.1. Del análisis de las metodologías existentes

- **Modificadores por comportamiento urbano.**

De los análisis detallados de la calibración de los modificadores por comportamiento incluidos en diferentes estudios, y usados en las metodologías empíricas de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, se concluye:

- Los modificadores se definen y caracterizan según el conocimiento de las irregularidades sísmicas que presentan las edificaciones para las tipologías constructivas de hormigón armado y mampostería.
- La calibración de los modificadores depende del daño observado en terremotos pasados. Se gradúan en intervalos $\pm 0,02$ sobre unos índices que oscilan desde -0.08 hasta $+0.08$.
- El estudio histórico del daño en diferentes terremotos hace que aparezcan nuevos modificadores. Por ejemplo, hasta el terremoto de Lorca, en España no se había tenido en cuenta el modificador de piso blando flexible para edificios de hormigón armado.
- La máxima penalización en edificios de mampostería se produce introduciendo modificadores para edificios con altura superior a seis plantas y en el caso de edificios de hormigón armado para alturas superiores a ocho plantas, con un valor máximo en ambos casos de $+0.08$.
- Los modificadores que indican una reducción de la vulnerabilidad en edificios de mampostería y en edificios de hormigón armado se refieren a los edificios con posición en manzana intermedia, con un valor en ambos casos de -0.04 . También, en edificios de hormigón armado, son las edificaciones con altura inferior o igual a dos plantas a las que se aplican modificadores con un valor de -0.04 .
- Por consiguiente, la incorporación de modificadores a los índices de vulnerabilidad permite representar bien las características geométricas, estructurales y de situación de los edificios.

- **Planeamiento Urbanístico en zonas sísmicas**

Del estudio del planeamiento urbanístico en zonas sísmicas, y en particular de las disposiciones de las normas urbanísticas las conclusiones principales son:

- A la hora de planificar ciudades en zonas sísmicas los planos geológicos, geotectónicos y topográficos son muy importantes, puesto que las características locales del terreno filtran o amplifican determinados rangos de frecuencia de las ondas sísmicas en relación con las registradas en roca (“efecto local o de sitio”) lo que modifica la vulnerabilidad de tipologías constructivas específicas, que debiera ser información de gran relevancia en los procesos de planeamiento urbano.
- La definición y caracterización de los parámetros que componen las normas urbanísticas de un plan general es fundamental para no crear ciudades irregulares sísmicamente, y por consiguiente, con una elevada vulnerabilidad sísmica.

- **Estudio exploratorio, relación con el daño.**

- En el tipo de suelo B ha habido una mayor correlación de los niveles de los parámetros urbanísticos con el daño, tanto en los edificios de mampostería como en los de hormigón armado.
- En los edificios de hormigón armado existe una cantidad mayor de parámetros urbanísticos que presentan relación con el daño que en los edificios de mampostería.

4. Conclusiones y líneas futuras

Este trabajo es un paso más hacia la evaluación de la vulnerabilidad de las ciudades, y más concretamente de la ciudad de Lorca, pero también contiene importantes aportaciones metodológicas. A partir de la experiencia adquirida en él y a partir de otros trabajos previos o recientes relacionados con la vulnerabilidad sísmica en entornos urbanos, se exponen a continuación algunas conclusiones y líneas de investigación abiertas.

Se deben desarrollar los métodos analíticos de análisis de la vulnerabilidad sísmica de forma que permita incorporar a los espectros de capacidad las características específicas de los edificios particulares (modificadores por comportamiento), especialmente las que están más relacionadas con el daño. Esto permitirá definir y caracterizar nuevos modificadores. Este estudio nos ha permitido identificar otros posibles modificadores que no se han tenido en cuenta en las metodologías actuales como es el caso de la Tipología edificatoria y que pueden estar relacionados con el daño. .

Este trabajo deja abierta una línea de investigación para que las administraciones públicas y los técnicos especializados en sismicidad trabajen conjuntamente para planificar ciudades regulares sísmicamente. Las administraciones deben aportar dentro de la documentación de un Plan General una cartografía de Vs30 y redactar Normas urbanísticas sismorresistentes en todas las ciudades con riesgo sísmico diferenciando en la definición y caracterización de los parámetros urbanísticos el tipo de suelo sobre el que se asienta el edificio y el tipo de construcción. Es conveniente crear y mantener bases de datos identificando y clasificando los

parámetros de carácter urbanístico potenciales modificadores de la vulnerabilidad frente a un sismo. Estas bases de datos serían una fuente de inestimable para la calibración de los modelos y métodos de evaluación de la vulnerabilidad.

Bibliografía

- ATC-13 (1985).** Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13. Applied Technology Council. Redwood City, California. 492 pp.
- Benedetti, D. and Petrini, V. (1984).** "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione." *L'industria delle Costruzioni* **149**: 66-78 (en italiano).
- Coburn, A. and Spence, R. (2002).** "Earthquake Protection (2nd edition)." John Wiley & Sons, Chichester, England. 420 pp.
- 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.
- Giovinazzi, S. and Lagomarsino, S. (2002).** WP04: Guidelines for the implementation of the I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings. Genoa, Italy.
- Giovinazzi, S. and Lagomarsino, S. (2003).** Comunicación personal, Genoa, Italy.
- Grunthal, G. (1998).** *European Macroseismic Scale 1998*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg. pp.
- Lagomarsino, S. and Giovinazzi, S. (2006).** "Macroseismic and mechanical models for the vulnerability assessment of current buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering. Special Issue "The Risk-UE Project"* **4** (4): 415-443.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., Podestà, S. and Resemini, S. (2002).** WP4-Vulnerability assesment of current buildings: I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings and guidelines for the implementation. RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk escenarios with application to different European towns. 28 pp.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., Podestà, S. and Resemini, S. (2003).** WP05. Vulnerability assesment of historical and monumental buildings. Handbook. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. 90 pp.
- Lantada, N. (2007).** "Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona." Tesis Doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 325 pp.
- Lantada, N., Irizarry, I., Barbat, A.H., Goula, X., Roca, A., Susagna, T. and Pujades, L.G. (2010).** "Seismic Hazard and Risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE Vulnerability index method." *Bulletin of Earthquake Engineering*. **8**:201-229.

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.

Murphy, P. (2006). *La vulnerabilidad de la edificación de la Región de Murcia.* En RISMUR, Riesgo sísmico de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Murcia: I.G.N; C.A.R. Murcia.

Ferliche Fernández-Castanys, M. (2012). “Elaboración de escenarios de daños sísmicos en la ciudad de Granada.” Tesis Doctoral. Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos. Universidad de Granada. 287 pp

Ferliche, M., Vidal, F., Alguacil, G. and Navarro, M. (2012). “Daños causados en construcciones de Lorca por la serie sísmica de 2011”. Homenaje a la profesora Maria Dolores Romacho Romero. Editorial Universidad de Almeria. 99-117pp.