UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**“MODELIZACIONES Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA EVALUACIÓN
INTEGRAL DEL RIESGO SÍSMICO A ESCALA URBANA. APLICACIÓN A LA CIUDAD
DE LORCA.”**

TESIS DOCTORAL

LIGIA ELENA QUIRÓS HERNÁNDEZ

Ingeniera sísmica: Dinámica de suelos y estructuras

2017

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA Y MATERIALES
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**“MODELIZACIONES Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA EVALUACIÓN
INTEGRAL DEL RIESGO SÍSMICO A ESCALA URBANA. APLICACIÓN A LA CIUDAD
DE LORCA.”**

LIGIA ELENA QUIRÓS HERNÁNDEZ

Ingeniera sísmica: Dinámica de suelos y estructuras

Directores:

MARÍA BELÉN BENITO OTERINO

Da. en Ciencias Físicas

MANUEL NAVARRO BERNAL

D. en Ciencias Físicas

2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la catedrática Belén Benito, directora de esta tesis, por su guía y apoyo incondicional desde el momento cero, por sus palabras de aliento, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo y por que trabajar a su lado es un privilegio.

También doy las gracias a mi co-director, Manuel Navarro, por sus siempre acertadas recomendaciones y por abrirme las puertas de su sitio de trabajo en la Universidad de Almería.

A los miembros del Grupo de Investigación en Ingeniería sísmica, por todos los conocimientos y momentos compartidos.

Por último y en especial, a la que me inspira desde el cielo, a mi esposo y a mi familia, por ser mi motor y mis razones para lograr cualquier meta.

RESUMEN

En esta tesis se presenta una propuesta metodológica para la evaluación integral del riesgo sísmico en un entorno urbano, con alto grado de resolución, identificando los métodos actuales y modelos óptimos para la caracterización de las cuatro fases principales en el cálculo del riesgo: peligrosidad, efecto local, vulnerabilidad y cuantificación del daño. Como contribución inédita se incorpora en la metodología un árbol lógico para considerar distintas distribuciones de vulnerabilidad que se simulan estocásticamente por un método de Montecarlo y diferentes métodos de cálculo del daño, con el fin de cuantificar las incertidumbres inherentes a estos dos aspectos.

La metodología propuesta es aplicada al núcleo urbano de la ciudad de Lorca, para la cual se realiza un cálculo de peligrosidad con enfoque probabilista-determinista, mediante dos métodos de cálculo: clásico zonificado (MCZ) e híbrido (MH) considerando como fuentes sísmicas zonas y fallas, del que se identifican dos escenarios sísmicos: 1) un sismo de Mw 5.2 a corta distancia para periodo de retorno PR 475 años y 2) Un sismo de Mw 6.3 a 15 km para PR de 975 años.

El primer escenario coincide con las características del sismo de Lorca, 2011, por lo que se simula el escenario de daños tomando la localización y el plano de ruptura de la falla de Alhama de Murcia que generó el terremoto, y considerando diferentes modelos de movimiento fuerte (GMPEs). Se analiza la sensibilidad de los diferentes modelos y métodos en los resultados de peligrosidad y se identifican los que reproducen mejor las aceleraciones registradas en el sismo de 2011.

Se realiza además un análisis de sensibilidad considerando distintas distribuciones de vulnerabilidad y efectuando simulaciones de Montecarlo con muestras de 100, 1000, 2000 y 3000 edificios, para valorar el efecto que tiene la asignación de vulnerabilidad en los resultados de daño. Este método se aplica al caso concreto de Lorca, calculando el daño para la distribución de vulnerabilidad de una muestra detallada obtenida en campaña de campo y para la vulnerabilidad asignada a todo el parque inmobiliario de la ciudad de Lorca, comparando los resultados teóricos con los daños observados tras el terremoto.

Los modelos y resultados de la calibración con el escenario del sismo de Lorca 2011, se utilizan para simular el segundo escenario, correspondiente a un sismo extremo de Mw 6.5, con 5 % de probabilidad de excedencia en 50 años. Estos resultados pueden ser de utilidad para la definición de planes de emergencia en la ciudad de Lorca.

Finalmente se extraen una serie de conclusiones referentes a las diferentes fases del cálculo, a los modelos que reproducen mejor el movimiento y los daños, al impacto de usar diferentes modelos y métodos en los resultados finales y a la incertidumbre inherente a cada aspecto del problema.

Se ha desarrollado un software específico para aplicar la metodología propuesta que puede considerarse otra contribución de esta tesis.

ABSTRACT

This thesis presents a methodological proposal for the comprehensive assessment of the seismic risk in an urban environment, with a high degree of resolution, identifying the current methods and optimal models for the characterization of the four main phases in the risk calculation: hazard, local effect, vulnerability and damage quantification. As an unpublished contribution, a logic tree is incorporated into the methodology for the consideration of different vulnerability distributions that are stochastically simulated by the Montecarlo method and different analysis procedures for damage estimation, in order to quantify the uncertainties inherent in these two aspects.

The proposed methodology is applied to the urban center of Lorca, Spain. A seismic hazard assessment is carried out with a probabilistic-deterministic approach, by means of two methods: classic area source method (MCZ) and an hybrid method (MH) considering zones and faults, from which two seismic scenarios are identified: 1) an Mw 5.2 earthquake at a short distance for a return period of RP 475 years and 2) an Mw 6.3 earthquake at 15 km for RP of 975 years.

The first scenario coincides with the characteristics of the earthquake of Lorca, 2011, so there is a simulation for the damage scenario taking into account the location and the plane of rupture of the fault Alhama de Murcia that generated the earthquake, and considering different ground motion prediction equations (GMPEs). The sensitivity of the different models and methods in the hazards assessment results is analyzed, identifying the ones that reproduce the best the accelerations recorded in the 2011 earthquake.

A sensitivity analysis was also performed with different vulnerability distributions and Montecarlo simulations with samples of 100, 1000, 2000 and 3000 buildings, in order to assess the effect of vulnerability distributions on the damage results. This method is applied to the specific case of Lorca, with the quantification of damage for the vulnerability assessment of a detailed building stock sample obtained in a field campaign and for the vulnerability assigned to the entire building stock of Lorca comparing the theoretical results with the observed damage after the earthquake.

The models and results of the calibration with the scenario of the 2011 Lorca earthquake are used to simulate the second scenario, corresponding to an extreme earthquake Mw 6.5, with a 5% probability of exceedance in 50 years. These results can be useful for the definition of emergency plans in Lorca.

Finally, a series of conclusions are drawn concerning the different phases of the calculation, the models that better reproduce movement and damage, the impact of using different models and methods in the final results and the uncertainty inherent in each aspect of the problem.

A specific software has been developed for the application of the proposed methodology. It can be considered as another contribution of this thesis.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN.....	3
1.2	OBJETIVOS	7
1.3	ALCANCE DEL ESTUDIO	8
1.4	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA DE TESIS	9
CAPÍTULO 2	ESTADO DEL ARTE EN LA EVALUACION DEL RIESGO SÍSMICO	11
2.1	FUNDAMENTOS ENTORNO AL RIESGO SÍSMICO	13
2.2	PELIGROSIDAD SÍSMICA	17
2.2.1	<i>Introducción.....</i>	17
2.2.2	<i>Metodologías (Peligrosidad en roca).....</i>	18
2.2.3	<i>Efecto Local (Peligrosidad en suelo)</i>	31
2.3	VULNERABILIDAD DE LOS EDIFICIOS.....	44
2.3.1.	<i>Introducción.....</i>	44
2.3.2.	<i>Metodologías.....</i>	45
2.4	CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO	51
CAPÍTULO 3	MODELIZACIONES Y TÉCNICAS PROPUESTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN ESPAÑA	55
3.1	INTRODUCCIÓN	57
3.2	ANÁLISIS SISMOTECTÓNICO	60
3.2.1	<i>Marco geodinámico de la Península Ibérica</i>	61
3.2.2	<i>Fallas activas</i>	62
3.2.3	<i>Zonas sismogénicas</i>	64
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS	68
3.3.1	<i>Catálogo sísmico.....</i>	68
3.3.2	<i>Modelización de la fuente sísmica</i>	75
3.3.3	<i>Modelos de movimiento fuerte.....</i>	83
3.4	ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ROCA	87
3.4.1	<i>Estimación probabilista de la peligrosidad</i>	87
3.4.2	<i>Cuantificación de incertidumbres y Árbol lógico.....</i>	88
3.4.3	<i>Curvas de peligrosidad y espectros de respuesta</i>	90
3.4.4	<i>Desagregación</i>	92
3.5	CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO LOCAL.....	93
3.5.1	<i>Geología del terreno</i>	93
3.5.2	<i>Modelos Vs</i>	94
3.5.3	<i>Factores de amplificación</i>	97
3.5.4	<i>Estimación de la peligrosidad sísmica incluyendo el efecto local</i>	99
3.6	EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD	100
3.6.1	<i>Construcción de la base de datos georreferenciada (SIG)</i>	100
3.6.2	<i>Estimación de la vulnerabilidad de los edificios.....</i>	104
3.6.3	<i>Cuantificación de incertidumbres en la asignación de vulnerabilidad</i>	108
3.7	ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO A ESCALA URBANO	111
3.7.1	<i>Estimación de daño en edificios.....</i>	113
3.7.2	<i>Clasificación y estimación de grados de daño</i>	125
3.7.3	<i>Otro parámetros de riesgo</i>	127
CAPÍTULO 4	APLICACIÓN: ESCENARIOS DE MOVIMIENTO FUERTE	135
4.1	INTRODUCCIÓN	137
4.2	ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD Y TECTÓNICA DE LA ZONA	139
4.2.1	<i>Fallas activas en la zona de influencia de Lorca</i>	141
4.2.1	<i>Zonificaciones seleccionadas según el método.....</i>	147

4.3	DATOS DE ENTRADA	150
4.3.1	Catálogo sísmico	150
4.3.2	Caracterización de las fuentes sísmicas	156
4.3.3	Selección de modelos de atenuación	171
4.3.4	Cuantificación del efecto local	176
4.4	ESPECIFICACIONES DE CÁLCULO	180
4.4.1	Estimación de la peligrosidad sísmica en roca	180
4.4.2	Árbol lógico	182
4.5	RESULTADOS DE PELIGROSIDAD EN ROCA	183
4.5.1	Mapas de aceleración en roca	183
4.5.2	Mapas de aceleración en suelo	194
4.5.3	Espectros resultantes	198
4.5.4	Desagregación	203
CAPÍTULO 5	SIMULACIÓN DEL ESCENARIO DE DAÑO ASOCIADO AL SISMO OBTENIDO PARA PR475	209
5.1	INTRODUCCIÓN	211
5.2	ESTUDIO DETERMINISTA	212
5.2.1	Características del terremoto	212
5.2.2	Modelos de atenuación y movimiento fuerte esperado	214
5.3	EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD EN LORCA	219
5.3.1	Asignación de vulnerabilidad a las edificaciones	227
5.3.2	Población	232
5.4	PARÁMETROS DE RIESGO SÍSMICO	233
5.4.1	Daño en edificaciones	233
5.4.2	Viviendas inhabitables y personas que quedarían sin hogar	242
5.4.3	Pérdidas humanas	244
5.4.4	Pérdidas económicas	247
CAPÍTULO 6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y COMPARATIVA CON DATOS DEL TERREMOTO DE LORCA DE 2011	251
6.1	INTRODUCCIÓN	253
6.2	MODELIZACIÓN DEL PLANO DE RUPTURA	254
6.3	COMPARATIVA DE MODELOS DE PREDICCIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE CON EL ESPECTRO DE ACELERACIONES REGISTRADAS DURANTE EL TERREMOTO DE LORCA	260
6.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD DE LOS EDIFICIOS	266
6.4.1	Método de Montecarlo para la asignación de vulnerabilidad	266
6.4.2	Test de normalidad Kolmogorov-Smirnov	271
6.4.3	Estadística del muestreo	277
6.4.4	Test de normalidad K-S para el caso de estudio de Lorca	287
6.4.5	Software desarrollado para la estimación del daño en edificios	290
6.5	COMPARACIÓN DE LOS DAÑOS OBTENIDOS DEL ESCENARIO PR475 CON LOS DAÑOS OBSERVADOS EN LORCA	293
6.5.1	Resultados por modelo de atenuación y método capacidad-demanda	293
6.5.2	Daños tras el terremoto de Lorca	297
6.5.3	Análisis de muestra obtenida en campo	300
6.5.4	Comparación de grados de daño de la metodología de riesgo utilizada y el triaje de color realizado en Lorca tras el terremoto	307
CAPÍTULO 7	SIMULACIÓN DEL ESCENARIO DE DAÑO ASOCIADO AL SISMO OBTENIDO PARA PR975	311
7.1	INTRODUCCIÓN	313
7.2	CARACTERÍSTICAS DEL TERREMOTO	314
7.2.1	Modelización del plano de ruptura	314
7.2.2	Movimiento fuerte y espectros específicos	316
7.3	ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO	320
7.3.1	Daño en edificaciones y viviendas	321
7.3.2	Viviendas inhabitables y personas sin hogar	325
7.3.3	Pérdidas humanas	327

7.3.4	<i>Pérdidas económicas</i>	330
CAPÍTULO 8	SUMARIO Y CONCLUSIONES	333
	REFERENCIAS	342
	ÍNDICE DE FIGURAS	355
	ÍNDICE DE TABLAS	363
	ANEXOS	367
	ANEXO A. DETALLE DEL MÉTODO HÍBRIDO DE ZONAS Y FALLA (MH).....	369
	ANEXO B. MÉTODO DE ANÁLISIS DE RESIDUOS.....	377

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

“Un fenómeno natural no se puede prevenir, la catástrofe sí se puede prevenir”.

Los terremotos son uno de los peligros naturales más devastadores, causantes de gran pérdida de vidas y medios de subsistencia. En promedio, alrededor de 25.000 personas mueren cada año debido a eventos sísmicos, causando un 56% de la mortalidad global asociada a desastres naturales en los últimos 20 años, mientras que las pérdidas económicas anuales resultan en miles de millones de dólares y a menudo constituyen un gran porcentaje del producto nacional bruto del país afectado. Aún así, estas cifras tan altas no pueden plasmar el coste a largo plazo que representa para las personas y las comunidades que sufren el embate de los desastres, que pagan con sus vidas, sus medios de sustento y sus expectativas futuras de desarrollo. (CRED 2016, UIP-UNISDR, 2010). La Figura 1.1 muestra el número de víctimas mortales por cada 100.000 habitantes en los 10 países con mayor número de muertes por sismos entre los años 1996 y 2015.

Figura 1.1. Mortalidad por cada 100.000 habitantes en los 10 países con mayor número de muertes por sismos de 1996 a 2015. Fuente: CRED, 2016.

En las últimas décadas, diversos terremotos han puesto de manifiesto la gran influencia que ejerce el comportamiento de los edificios en los resultados finales de pérdidas humanas y económicas. A pesar de los múltiples avances tecnológicos, así como de la mejora en las técnicas constructivas, continua siendo de vital importancia el conocimiento de la peligrosidad y el riesgo sísmico que afecta a una población, con el fin de introducir medidas preventivas y de mitigación. Las primeras se dirigen esencialmente a un adecuado diseño sismorresistente y las segundas deben enfocarse a la elaboración de planes de emergencia para actuaciones rápidas y eficaces post-evento, destinadas a mitigar los efectos una vez ocurrido el terremoto.

La ocurrencia de un determinado desastre no sólo depende de que exista una alta amenaza o peligrosidad en una zona determinada sino también, y de forma decisiva, de la vulnerabilidad de las construcciones expuestas. Una ciudad con bajo nivel de peligro sísmico puede presentar edificios de características vulnerables debido a la ausencia de normas de diseño sismorresistente, por lo que ante un terremoto de magnitud moderada puede desencadenarse un desastre. Este es, por ejemplo, el caso del sismo de Haití en 2010, que siendo de magnitud moderada Mw 7 causó cerca de 300.000 víctimas mortales. Subestimar la amenaza y no tomar medidas sismorresistentes que reduzcan la vulnerabilidad es la razón por la cual algunos terremotos en zonas de sismicidad moderada se convierten en desastres.

La evaluación del riesgo determina su naturaleza y extensión, con el objetivo de medir sus consecuencias en la sociedad afectada. Esto se consigue analizando las relaciones de dependencia entre los distintos factores de riesgo involucrados y estudiando la ocurrencia y lecciones aprendidas de sucesos anteriores (Meli et al. 2005). Conocer el nivel de riesgo sísmico en las áreas urbanas no solo es necesario, sino de vital importancia, y debe ser previo a la ordenación y planeamiento del territorio en zonas sísmicas. La estimación de los escenarios de daños sísmicos, así como de las víctimas potenciales asociadas a ellos, es absolutamente imprescindible para poder desarrollar planes de emergencia ante el riesgo sísmico a escala local. En ellos se establece la organización y los procedimientos de actuación, con el objeto de afrontar eficazmente las emergencias que los terremotos pueden causar sobre la población, en lo referente sobre todo a pérdidas humanas y materiales.

La infraestructura y la construcción de ciudades deben ser hechas en base a evaluaciones de riesgo bien elaboradas para evitar que los beneficios en términos socioeconómicos de pronto se pierdan debido a las catástrofes.

Esta tesis se orienta, por tanto, hacia la evaluación del riesgo sísmico en grandes zonas urbanas con una aplicación en la ciudad de Lorca, donde el peligro sísmico, entendido como la probabilidad de que

se excedan movimientos con capacidad destructora, es moderado en un contexto mundial, pero elevado en comparación con el de otras regiones españolas.

El Terremoto de Lorca

La Región de Murcia es una de las zonas con mayor actividad sísmica de España, y ello es debido a que se encuentra en un sistema de fallas asociado al límite de placas entre Euroasia y África, un límite convergente de tipo continente-continente que origina una sismicidad difusa, que en el caso de España se reparte fundamentalmente por el sur y sur-este en la zona de las Béticas.

El 11 de Mayo de 2011 se produjo en Lorca, Región de Murcia, un terremoto de magnitud Mw 5.1-5.2, que apesar de ser moderada dejó 9 víctimas mortales, 394 heridos, el 80% de los edificios dañados y un daño material valorado en 800 millones de euros, siendo uno de los terremotos más significativos de España en los últimos años. Este terremoto fue especialmente catastrófico debido a la combinación de una magnitud moderada con poca profundidad y corta distancia epicentral a la población.

Figura 1.2. Edificio colapsado durante el terremoto de Lorca.

Se estima que el 80% de las viviendas fueron dañadas en alguna parte. Según la concejalía municipal de urbanismo, el número de viviendas demolidas había sido de 1649, además de 45 naves y un número indeterminado de otras construcciones. Tanto el edificio colapsado durante el sismo, en la zona de La Viña, como muchos de los edificios derribados consistían en edificaciones modernas. Cabe preguntarse entonces, ¿por qué edificios contruidos hace menos de diez años han colapsado o han tenido que se derrumbados, mientras que otros contruidos hace siglos o con métodos tradicionales resistieron de forma ejemplar? ¿Se deben los daños a las características especiales del terremoto ocurrido o a malas prácticas constructivas y carencias sismorresistentes en la normativa de construcción? y por último,

Capítulo 1

¿En que medida los métodos existentes para la estimación del riesgo sísmico son capaces de reproducir un escenario de iguales características que el sismo ocurrido en Lorca?

Estas son cuestiones abiertas cuya resolución marca los objetivos de esta tesis.

1.2 OBJETIVOS

Esta tesis ha sido desarrollada con el objetivo fundamental de identificar los métodos y modelos óptimos dentro de las cuatro fases principales de la evaluación del riesgo sísmico: peligrosidad, efecto local, vulnerabilidad y cuantificación del daño, compilándolos en una metodología que permita llevar a cabo un estudio integral de riesgo sísmico de principio a fin en cualquier entorno urbano, con un alto grado de resolución, y analizar el efecto que tiene la elección de diferentes modelos en cada fase sobre los resultados finales del cálculo. La metodología propuesta se aplica al núcleo urbano de la ciudad de Lorca y los resultados teóricos se comparan con registros y daños reales observados tras el terremoto del 11 de mayo de 2011. Esto permite la calibración de métodos y modelos para reproducir mejor el escenario de daños reales causado por el terremoto.

En este contexto, se presenta un procedimiento metodológico con los siguientes objetivos específicos, referentes a su aplicación:

- Realizar un cálculo de peligrosidad sísmica para la ciudad de Lorca utilizando dos métodos de modelización de las fuentes sísmicas: el método clásico zonificado y una metodología híbrida de zonas y fallas, que permite incluir las fallas como fuentes independientes en el cálculo. Comparar los resultados para analizar la influencia de la modelización de fallas en la estimación de la peligrosidad.
- Realizar el cálculo de peligrosidad en Lorca desde un enfoque híbrido probabilista-determinista mediante diferentes modelos de atenuación para analizar la sensibilidad en cuanto a la elección de estos modelos y determinar el modelo que más se ajusta a los datos registrados tras el terremoto de Lorca.
- Cuantificar las incertidumbres generadas por la aleatoriedad en la asignación de las tipologías constructivas sobre la base de datos catastral de edificios e incorporar estas incertidumbres al cálculo.
- Incorporar un árbol lógico en la estimación del daño y cuantificar el daño en las edificaciones de manera analítica mediante dos procedimientos de la ATC-55: I-DCM y MADRS, para analizar la sensibilidad de los resultados en cuanto a la elección del método capacidad-demanda.
- Aplicar la metodología a una muestra de edificios de Lorca evaluada en campo para esta tesis, y comparar los resultados con los daños observados en estos edificios tras el terremoto.

1.3 ALCANCE DEL ESTUDIO

En este estudio se realizan una serie de análisis de sensibilidad que permitan extraer conclusiones en cuanto a los modelos de sismicidad y atenuación que mejor representan los escenarios sísmicos en localidades españolas. Además, se incorporan a la metodología de evaluación del riesgo ciertas recomendaciones, así como la cuantificación de incertidumbres en la asignación de tipologías constructivas a la hora de estimar las probabilidades de daño en las edificaciones.

Para optimizar el tiempo de cálculo del gran número de simulaciones realizadas, se desarrolló un software que calcula el desplazamiento espectral de las edificaciones y las probabilidades de daño para una base de datos de hasta 120.000 registros en una misma ejecución, mediante los métodos de análisis estáticos no-lineales I-DCM y MADRS.

También se ha incorporado a la metodología un árbol lógico en la estimación de daño, lo que permite tomar en cuenta en el cálculo las incertidumbres asociadas a la elección de los modelos de atenuación y de capacidad-demanda.

En este trabajo se presenta la metodología propuesta y se realiza una aplicación en el núcleo urbano de la ciudad de Lorca. Los resultados de la implementación de este procedimiento en una localidad concreta (en este caso Lorca) permitirán:

- Conocer las zonas de la población más propensas a sufrir daños a causa de los terremotos que ocurran en su área de influencia dentro de unos márgenes de probabilidad pre-establecidos.
- Cuantificar el daño en las edificaciones y viviendas, el número de viviendas que resultarían inhabitables y personas sin hogar.
- Estimar el número de personas que pueden resultar heridas y muertas a causa del movimiento sísmico esperado en cada unidad de trabajo.
- Valorar el coste económico asociado a los daños producidos en las estructuras de la ciudad (coste de reconstrucción, reparación, etc.).

Estos resultados serán de utilidad e importancia significativa para la ejecución de actividades relacionadas con la planificación urbana y la gestión del riesgo sísmico.

Se presentan para la ciudad de Lorca mapas de peligrosidad para periodos de retorno de 475 años y 975 años, y mapas representativos del riesgo sísmico asociados a los dos escenarios sísmicos derivados del estudio de peligrosidad: un sismo de Mw 5.2, con las mismas características del sismo ocurrido el 11 de mayo de 2011, y un sismo de Mw 6.5.

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA DE TESIS

El trabajo desarrollado para esta tesis doctoral se presenta estructurado en ocho capítulos, que se describen a continuación.

- **Capítulo 1:** presenta la introducción al contenido de la tesis, describiendo los objetivos del estudio, el alcance del trabajo desarrollado y la motivación para llevar a cabo el mismo, la cual reside en el afán de contribuir a reproducir de la manera más realista posible los escenarios sísmicos ocurridos y los daños observados, para predecir y prevenir las pérdidas que puedan causar escenarios probables por eventos futuros.
- **Capítulo 2:** describe el estado del arte en estudios de evaluación del riesgo sísmico. Se incluyen los conceptos fundamentales del riesgo sísmico y se exponen las metodologías existentes en la literatura, antecedentes y referencias para las cuatro fases principales del riesgo sísmico: peligrosidad, efecto local, vulnerabilidad y cuantificación del daño.
- **Capítulo 3:** en este capítulo se presenta una propuesta metodológica con las modelizaciones y técnicas existentes consideradas óptimas para cada fase de cálculo del riesgo sísmico, con la intención de que sirva como guía para un estudio completo de riesgo. La propuesta incluye modelos específicos para su aplicación a ciudades de España. Se detallan cada una de las fases, indicando los datos requeridos y procedimientos para su aplicación a escenarios urbanos, con alto grado de resolución. Por otra parte, se incluyen en la propuesta metodológica algunas recomendaciones y criterios para cuantificar las incertidumbres que conlleva el proceso de asignación de tipologías constructivas a las edificaciones.
- **Capítulo 4:** se desarrolla la aplicación de la metodología expuesta en el Capítulo 3 al núcleo urbano de la ciudad de Lorca. Para la estimación de peligrosidad se utilizan distintos modelos de fuente y de atenuación facilitando un análisis de sensibilidad en cuanto a las diferentes opciones de cálculo. Todos estos modelos son incorporados en un árbol lógico, y los resultados son representados en mapas de peligrosidad para distintas ordenadas espectrales. Finalmente, se obtienen los escenarios de movimiento fuerte, con carácter probabilista-determinista, que serán establecidos como input para la estimación del riesgo. Estos escenarios corresponden a un sismo probable de magnitud Mw 5.2, con PR 475 años, como el ocurrido en Lorca en 2011 y a otro de Mw 6.5, con PR 975 años, que puede considerarse como un sismo extremo.
- **Capítulo 5:** muestra el cálculo determinista y estimación del riesgo sísmico para el escenario obtenido de la desagregación como sismo más probable, asociado al periodo de retorno de 475

años. Puesto que éste coincide en magnitud y distancia con el sismo ocurrido en Lorca el 11 de mayo de 2011, se realiza una simulación del mismo, tomando en cuenta las características del sismo y de la falla a la que se ha asociado. Se desarrolla el análisis de vulnerabilidad de las edificaciones de Lorca y la estimación de las probabilidades de daño y otros indicadores globales del riesgo, presentando finalmente una colección de mapas representativos del riesgo esperado para este escenario.

- **Capítulo 6:** presenta una serie de análisis de sensibilidad y comparaciones realizadas con la información existente y características del terremoto de Lorca (2011), a través de los modelos y metodologías expuestos en los capítulos anteriores. Se describen los modelos de fuente y de atenuación utilizados para la simulación del sismo, comparándolos con los registros obtenidos en las diferentes estaciones del IGN en la Región de Murcia por el sismo de 2011. Se muestra un análisis de sensibilidad realizado en cuánto a la asignación de tipologías constructivas sobre la base datos de edificaciones de Lorca para cuantificar las incertidumbres encontradas en este proceso e incorporarlas al cálculo del riesgo mediante un método de Montecarlo. Se realiza de igual manera este análisis de sensibilidad para una muestra de edificios evaluada en un trabajo de campo, comparando los resultados obtenidos para esta muestra considerada como real, con los resultados obtenidos para muestras teóricas. Finalmente, se realiza una comparación de los daños obtenidos de la simulación, con los daños reales observados tras el terremoto.
- **Capítulo 7:** se expone la aplicación de la metodología propuesta y resultados del análisis de sensibilidad realizados, al segundo escenario obtenido de la desagregación de la peligrosidad, correspondiente a un sismo extremo (M_w 6.5) asociado al periodo de retorno de 975 años. Se obtienen como resultado un conjunto de mapas representativos de la peligrosidad y de los diferentes parámetros indicativos del riesgo sísmico urbano para escenario.
- **Capítulo 8:** contiene un sumario del trabajo realizado, junto con las conclusiones derivadas de los resultados de todas las fases, recomendaciones y líneas futuras de investigación.
- **Referencias:** bibliografía y publicaciones citadas en esta tesis y consultadas para el estudio.
- **Anexos:** se incluye información complementaria y de detalle sobre métodos aplicados en esta tesis, que puedan resultar útiles para estudios futuros. (Anexo 1: Detalle de la aplicación de la metodología híbrida de zonas y fallas (MHZF), Anexo 2: Métodos de análisis de residuos y contraste de modelos.)

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE EN LA EVALUACION DEL RIESGO SÍSMICO

2.1 FUNDAMENTOS ENTORNO AL RIESGO SÍSMICO

El riesgo sísmico se define como la función de probabilidad de pérdidas derivadas de los daños a un elemento o conjunto de elementos (pe. una ciudad) como consecuencia de la acción de terremotos (López Arroyo y Villacañas, 1999).

En otras palabras, se enmarcan dentro del riesgo sísmico las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado del fallo de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por los esfuerzos estructurales derivados de la acción de un terremoto. El riesgo se estima mediante la convolución entre la peligrosidad, asociada a las características geológicas y sísmicas, y la vulnerabilidad, asociada a las tipologías constructivas y sus capacidades resistentes, correspondiente a cada nivel de severidad considerado para el sismo. Las consecuencias pueden ser de tipo físico, económico, financiero, social, humano, etc.

La definición oficial de los términos para la evaluación de riesgo en desastres naturales se estableció en una convención nacional acordada por una reunión de expertos y organizada por la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en casos de Desastre (UNDRO) en 1979. El término riesgo se refiere a las pérdidas esperadas a causa de una amenaza determinada en un elemento en riesgo, durante un periodo específico en el futuro. Según la manera en que se defina el elemento en riesgo, el riesgo puede medirse según la pérdida económica esperada, o según el número de vidas perdidas o la extensión del daño físico a la propiedad. (Coburn et al., 1991).

De lo determinado del reporte "Desastres naturales y análisis de vulnerabilidad" (UNDRO-UNESCO), se desprende que en la determinación del riesgo existen tres componentes esenciales, cada una de los cuales debe cuantificarse separadamente:

- a. La probabilidad de acontecer la amenaza: la posibilidad de experimentar una amenaza natural o tecnológica en un lugar o región. La amenaza, también denominada peligrosidad, de forma matemática se expresa como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con cierta intensidad, en un cierto sitio y en cierto periodo de tiempo.
- b. Los elementos en riesgo: identificación y preparación de un inventario de la gente o edificaciones u otros elementos que podrían verse afectados en caso de ocurrir la amenaza y, donde sea necesario, la estimación de su valor económico.

- c. La vulnerabilidad de los elementos en riesgo: qué daño sufrirá la gente y las construcciones u otros elementos si experimentan algún nivel de peligro

Cada uno de estos componentes no representa uno sino varios parámetros a ser evaluados. La cuantificación de la probabilidad de amenaza implica no sólo la probabilidad de que ocurra un terremoto, por ejemplo, sino también la probabilidad de que ocurran terremotos de una gran variedad de intensidades. Un terremoto de elevada magnitud será menos común que uno de magnitud menor. Un terremoto de muy elevada magnitud será aún menos común.

Cabe resaltar, que la peligrosidad y el riesgo sísmico son fundamentalmente diferentes. La peligrosidad está relacionada con la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural como el temblor del suelo, la rotura de fallas o la licuefacción del terreno que desencadena un terremoto, mientras que el riesgo sísmico es la probabilidad de que los seres humanos incurran en pérdidas o daños en las construcciones si están expuestos a un peligro sísmico. En otras palabras, el riesgo sísmico es una interacción entre el riesgo sísmico y la vulnerabilidad (los seres humanos o el entorno urbano).

Según la definición de UNDRO (1979), el Riesgo Sísmico R , en una determinada población, se define como:

$$R = H \otimes V \otimes E \otimes C \quad [2-1]$$

siendo:

H , Peligrosidad sísmica que determina el movimiento esperado en la población.

V , Vulnerabilidad de las estructuras.

E , Exposición o densidad de estructuras y habitantes.

C , Coste de reparación o de pérdidas.

Siguiendo estrictamente la definición anterior, el riesgo vendría expresado en términos económicos, que representarían el coste de reparación por pérdidas ante el movimiento estimado en el cálculo de la peligrosidad.

Consecuentemente en el riesgo sísmico influyen los siguientes factores:

- Probabilidad de que se produzca un evento sísmico o terremoto.
- Posibles efectos locales de amplificación de las ondas sísmicas, directividad, etc.
- Vulnerabilidad de las construcciones.
- Existencia de habitantes y bienes que puedan ser perjudicados.

El riesgo sísmico depende fuertemente de la cantidad y tipo de asentamientos humanos presentes en la localización estudiada.

Hay que considerar que si bien es posible construir edificios que a priori resistan cualquier tipo de sismo, generalmente no es económicamente viable, y muy particularmente en zonas con escasos recursos. El cálculo del riesgo sísmico es por tanto un factor importante para la planificación de las construcciones situadas en regiones sísmicas, especialmente aquellas de significativa importancia como hospitales, escuelas, plantas nucleares, etcétera.

Los esfuerzos estructurales que el sismo provoca sobre las estructuras y las edificaciones dependen de multitud de factores, entre otros: las características dinámicas del evento, la zona geográfica, las propiedades del suelo y la estructura, la interacción suelo-estructura, el propio movimiento sísmico, la capacidad de liberar energía de la estructura, etc.

El desarrollo y, sobre todo, la aplicación de diferentes metodologías de modelado del riesgo sísmico deben adaptarse, en cada caso, al nivel de información disponible. Dicha información varía en gran manera según las regiones, y suele estar directamente relacionada con el nivel de amenaza sísmica y el desarrollo socioeconómico de la zona de estudio. Los Sistemas de Información Geográfica constituyen una avanzada herramienta de ayuda en la toma de decisiones, que debe emplearse en los estudios de riesgo, especialmente en la creación de escenarios de riesgo en zonas urbanas, en las cuales se hace imprescindible la gestión de una gran cantidad de información espacial y temática.

Una de las grandes iniciativas, pionera en desarrollar una metodología de análisis de riesgo sísmico, fue la propuesta en 1985 (ATC-13, 1985) por el Applied Technology Council (ATC) bajo los auspicios de la Federal Emergency Management Agency (FEMA). Además de ésta, a nivel internacional destacan grandes proyectos que integran aspectos del riesgo sísmico y que emplean Sistemas de Información Geográfica:

- Proyecto RADIUS (Okazaki y RADIUS, 2000; RADIUS, 2000), cuyo objetivo era el estudio y desarrollo de herramientas de evaluación del riesgo sísmico para el diagnóstico de zonas urbanas contra desastres sísmicos, en nueve ciudades del mundo.
- Proyecto SERGISAI (Cella et al., 1998; SERGISAI, 1998), proyecto europeo en el que se desarrolló una herramienta computacional con la implementación de una metodología del riesgo sísmico a diferentes escalas y ámbitos geográficos.

- HAZUS (FEMA/NIBS, 1999), que proporciona una herramienta de análisis y cuantificación de diferentes riesgos naturales en Estados Unidos, incluyendo el riesgo sísmico, con una metodología extrapolable y conocida a nivel internacional.
- Proyecto Risk-UE (RISK-UE; Mouroux et al., 2004), con la participación de siete países europeos para desarrollar una metodología aplicable a estudios de riesgo sísmico en Europa.
- GEM (del inglés, *Global Earthquake Model*, 2009), iniciado con el objetivo de compilar información mundial sobre fallas activas y fuentes sísmicas, sus objetivos se redefinieron hacia el estudio de la vulnerabilidad de las zonas más densamente pobladas, la generación de una base de datos científicos compartida a nivel mundial que sirviera para que los estados de los países en desarrollo cuenten con datos que posibiliten la toma de decisiones preventivas. Actualmente, GEM está desarrollando un software libre para la estimación de peligrosidad y riesgo sísmico con funciones implementadas de diversas metodologías.
- Proyecto GAR (del inglés, *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*) (2011), con el objetivo de explorar y aplicar las últimas tendencias en la estimación de riesgo de desastres en diferentes regiones y para países de diferente desarrollo socioeconómico. También han desarrollado una plataforma para compartir datos globales en temas de riesgo y aplicar metodologías probabilistas del riesgo sísmico.

2.2 PELIGROSIDAD SÍSMICA

2.2.1 Introducción

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un cierto valor de la intensidad del movimiento del suelo producido por terremotos, en un determinado emplazamiento y durante un periodo de tiempo dado (UNDRO, 1980).

La evaluación de la peligrosidad, es decir la caracterización del movimiento esperado en un cierto emplazamiento, requiere, con independencia de la metodología empleada, agregar la contribución de tres factores:

- a) Fuentes sísmicas. Supone la identificación de las fuentes potencialmente activas que afectan al emplazamiento de estudio y caracterizar la sismicidad que en ellas puede generarse. Dependiendo del planteamiento del estudio (determinista o probabilista) deberán determinarse los sismos máximos potenciales, es decir la magnitud máxima M_{max} o bien los patrones de sismicidad de cada zona por medio de leyes de recurrencia, que reflejen la frecuencia de ocurrencia de sismos de diferente magnitud. En cualquier caso, caracterizar la fuente implica conocer una medida de la energía que puede liberarse por sismos futuros.
- b) Atenuación del movimiento. La energía liberada en la fuente se propaga en forma de ondas sísmicas cuya amplitud se atenúa en su trayecto desde la fuente al emplazamiento de estudio. Este efecto de atenuación es incluido por medio de modelos empíricos o teóricos. Estos modelos predicen la atenuación del movimiento del terreno, como una función de muchas variables tales como la magnitud del terremoto, la distancia, el mecanismo de falla, la presencia potencial de efectos de directividad, etc.
- c) Efecto local. La geología local y la topografía del emplazamiento de estudio pueden alterar de forma muy significativa la radiación incidente sobre la base rocosa, produciendo cambios importantes tanto en las amplitudes como en las frecuencias del movimiento. Este efecto es conocido como efecto local o de sitio y debe cuantificarse en función de las características litológicas, topográficas y de la estructura del subsuelo bajo el emplazamiento en cuestión.

La Figura 2.1 sintetiza la contribución de los tres factores mencionados en la estimación del movimiento esperado en un cierto emplazamiento o población con una probabilidad dada, es decir en la evaluación de la peligrosidad sísmica.

Figura 2.1: Elementos principales en la estimación de la peligrosidad sísmica,

Un planteamiento habitual es la estimación de la peligrosidad en emplazamientos genéricos en roca, añadiendo posteriormente el efecto local. A continuación se exponen las metodologías seguidas en el cálculo de la peligrosidad según este planteamiento y posteriormente lo relacionado con la cuantificación del efecto local.

2.2.2 Metodologías (Peligrosidad en roca)

Actualmente podemos dividir en dos grupos los métodos de cálculo de la peligrosidad:

- Método de cálculo determinista DSHA.
- Método de cálculo probabilista PSHA.

Para el uso del método determinista tan sólo es necesario conocer el máximo sismo potencial o el terremoto característico, mientras que en el método probabilista se requiere la estimación previa de leyes de recurrencia de los sismos en cada falla o zona sismogénica.

Prácticamente todas las normativas, como norma general, tienden a recomendar una metodología probabilista, pero sin erradicar completamente el método determinista que en muchos casos se propone como complementario para calibrar, con los valores máximos obtenidos, los sismos de control deducidos de forma probabilista (RG 1.165, 1997).

2.2.2.1. Metodología Determinista (DSHA)

El método determinista DSHA (del inglés *Deterministic Seismic Hazard Assessment*) fue pionero en la evaluación de la peligrosidad sísmica, siendo generalizada su utilización a partir de su aparición en los años 60, y extendiéndose su aplicación durante varias décadas.

En este tipo de estudios, se deduce la acción sísmica en el emplazamiento, pero sin embargo no se obtiene información alguna sobre su periodo de retorno. Asimismo tampoco se consideran los errores o incertidumbres introducidas a través del proceso de cálculo y generalmente determinan el movimiento máximo que puede producirse en el emplazamiento como consecuencia del peor escenario posible, sin establecer si ese movimiento se puede dar una vez cada 100 años, cada 1000, etc., es decir, no cuantifican la probabilidad asociada. Todo ello conlleva como desventaja, que se tiendan a tomar criterios muy conservadores.

El proceso de cálculo seguido en estos métodos, se subdivide en las cuatro fases enumeradas a continuación:

1. Definición del área de influencia en el emplazamiento e identificación de las fuentes sísmicas o estructuras de fallas englobadas en ellas. Si la sismicidad se puede considerar homogénea en toda el área, se define una única fuente sísmica de influencia global, y el método entonces se denomina no zonificado. Si se identifican zonas con potencial sísmico diferente, se entiende que el método es zonificado.
2. Estimación de los máximos terremotos ocurridos en el área de influencia o en cada una de las zonas fuente. Determinación, si ha lugar, de los sismos característicos y definición del máximo sismo potencial que se puede generar, previsiblemente, en cada zona o estructura delimitada.
3. Estimación de la acción sísmica en el emplazamiento, causada por los máximos sismos potenciales de cada zona o de toda el área. Por la hipótesis asumida de que la sismicidad es aleatoria en cada zona, el sismo máximo podría tener lugar en cualquier parte de la misma. Por ello, siguiendo un criterio conservador, dicho sismo se sitúa en el punto de la zona más cercano al lugar donde se realiza la predicción, es decir a la distancia mínima. La aplicación de leyes de atenuación con la distancia proporciona entonces valores de la intensidad del movimiento en el emplazamiento, como consecuencia de la actividad de cada zona definida.

4. Determinación de la peligrosidad en el emplazamiento, tomando el máximo valor de intensidad del movimiento generado por las diferentes zonas, con lo que la peligrosidad queda caracterizada por el límite superior del movimiento en el punto.

Este tipo de métodos tiene como gran ventaja la simplicidad de aplicación en comparación con los métodos probabilistas, además de definir el escenario que determina el máximo movimiento que representa la peligrosidad. Sin embargo, conlleva varios aspectos negativos, siendo el principal de ellos la falta de conocimiento de la probabilidad asociada al movimiento en cuestión. Además, en la caracterización de las fuentes únicamente se tiene en cuenta el mayor terremoto, sin considerar su ley de recurrencia.

Por otra parte, encontramos dificultades intrínsecas al método en sí, como la complejidad para definir el peor escenario posible. En principio, para elegir este peor escenario, lo primero que habría que hacer es buscar el evento de magnitud máxima que podría ocurrir en la falla más cercana a un emplazamiento. Esto que a priori podría resultar simple, en la práctica conlleva varias dificultades asociadas. Consideremos el caso hipotético utilizado por Baker (2008) para ejemplificar la problemática, en el cual existe un sitio hipotético mostrado en la Figura 2.2, que se encuentra a 10 km de una falla capaz de producir un terremoto con una magnitud máxima de 6.5. También se encuentra a 30 km de una falla capaz de producir un terremoto de magnitud 7.5. Las medianas de los espectros de respuesta de estos dos eventos se muestran en la Figura 2.2. Como se aprecia en la figura, el evento cercano de pequeña magnitud produce amplitudes de aceleración espectral mayores en periodos cortos, pero el evento de mayor magnitud produce amplitudes mayores en periodos largos. Así, aunque se podría tomar la envolvente de los dos espectros, no existe un único "peor escenario" que produzca la máxima amplitud de aceleración espectral en todos los períodos. Este hecho tiene a su vez su repercusión en el riesgo asociado a elementos de diferente periodo estructural. Quedarían dos cuestiones abiertas: ¿Cuál de los dos espectros asociados a los dos sismos considerados representa el peor escenario? ¿Cuál de los dos debería tomarse como input para el cálculo del riesgo sísmico?

Figura 2.2. (a) Vista de mapa de un emplazamiento ilustrativo, con dos fuentes cercanas capaces de producir terremotos. (b) Espectros de respuesta previstos de los dos eventos sísmicos, que ilustran que los eventos que producen las aceleraciones espectrales máximas pueden variar dependiendo del período de interés (predicción obtenida del modelo de Campbell y Bozorgnia 2008). Fuente: An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). Baker, J. (2008)

Resultados de los DSHA: Espectros asociados a un cierto escenario determinista.

El resultado de los métodos deterministas, que representará la acción sísmica a incluir como input de cálculo del riesgo sísmico, son los valores del parámetro de movimiento o espectros de respuesta que representen el peor escenario posible o bien un escenario específico, con la problemática descrita anteriormente. Una manera de solventar esta problemática es combinar este método con un método probabilista previo y una correspondiente desagregación de la peligrosidad que permita conocer los sismos que contribuyen con mayor probabilidad al movimiento esperado para un periodo de retorno determinado. Los espectros específicos calculados de manera determinista para estos sismos se identificarán con las curvas de demanda en el cálculo del riesgo sísmico.

2.2.2.2. Métodos Probabilistas (PSHA)

Los métodos probabilistas empezaron a ser desarrollados a finales de los años 60 (Cornell, 1969; Esteva, 1968). El objetivo de estos métodos es estimar las acciones sísmicas en el emplazamiento con una probabilidad asociada, lo que permite diseñar una construcción para cualquier nivel de riesgo aceptable, así como llevar a cabo un análisis de las incertidumbres derivadas de la aplicación de las distintas opciones de cálculo (LLNL, 1989).

El análisis probabilístico del riesgo sísmico ha sido un método ampliamente utilizado para derivar la relación entre los valores del movimiento del suelo y sus períodos de retorno, caracterizando así la acción sísmica para el posterior cálculo del riesgo sísmico. (Wang Z.,2005)

La metodología probabilista más utilizada es la conocida como PSHA (del inglés *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*) que fue originalmente propuesta en la guía metodológica del análisis probabilista de la peligrosidad sísmica (NRC-DOE-EPRI 1997). Su objetivo es que tanto los resultados obtenidos como el estudio de peligrosidad propiamente dicho, se muestren de la forma más general y completa posible, y para ello se incide en la importancia de identificar la naturaleza de la incertidumbre de los diversos factores que intervienen en el cálculo y cuantificar dicha incertidumbre apropiadamente.

Así, se han ido incluyendo nuevos elementos respecto a los primeros modelos probabilistas, como son el análisis cuantitativo de incertidumbres, el concepto de árbol lógico y la desagregación de la peligrosidad, que suponen una mejora de los métodos convencionales del cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica. Su relevancia se ha puesto de manifiesto en los últimos años.

Las fases de un estudio PSHA, de acuerdo a lo descrito en el *Sistema experto de análisis probabilista de la Peligrosidad sísmica* (Proyecto Expel, Consejo de Seguridad Nuclear, 2008) (Figura 2.3), se resumen en:

1. Determinación de los parámetros y opciones de entrada para el cálculo de la peligrosidad sísmica, incluyendo:
 - a. Definición de fuentes sísmicas, diferenciando entre fallas y áreas de sismicidad homogénea (métodos zonificados) o zonas de sismicidad distribuida (métodos no zonificados).
 - b. Definición de los modelos de sismicidad (distribución de magnitud o de intensidad) y de recurrencia temporal de terremotos.
 - c. Modelos del movimiento fuerte del suelo asociados a cada falla y a cada zona sismogénica.
2. Configuración del árbol lógico con todas las opciones y parámetros de entrada sujetos a variabilidad.
3. Asignación de un conjunto de pesos (o probabilidades) a las diferentes ramas del árbol lógico, acorde con las opiniones de un comité de expertos.
4. Cálculo de la peligrosidad para todos los conjuntos de opciones de entrada representadas en el árbol lógico, incluyendo, si da lugar, simulaciones estocásticas.

5. Presentación de los resultados de peligrosidad en curvas, espectros y, si es pertinente, en mapas.

Figura 2.3: Fases del cálculo de la probabilidad mediante el método probabilista (modificado de Benito y Jiménez, 1999). Fuente: Proyecto Expel: Sistema experto de análisis probabilista de la peligrosidad sísmica (2008)

En este método, al contrario del método determinista antes descrito, son considerados los efectos de cualquiera de los terremotos que pueden afectar a una localización determinada, y su frecuencia de ocurrencia se incluye por medio de leyes de recurrencia.

Los dos elementos principales en la estimación de la peligrosidad sísmica (en roca) según esta metodología, son los descritos a continuación:

Caracterización de las fuentes sísmicas. En contraste con el planteamiento determinista anterior, que se centró sólo en el evento asociado al peor escenario, aquí estamos interesados en todas las fuentes de terremotos capaces de afectar al emplazamiento. Estas fuentes podrían ser fallas y si las fallas individuales no son identificables, las fuentes sísmicas pueden ser descritas por regiones o zonas sismogénicas en las que se suma un potencial sísmico homogéneo, con ocurrencia poissoniana de la

sismicidad. Estas fuentes son estudiadas y caracterizadas por medio de modelos matemáticos que se ajustan a las características de un patrón de sismicidad. Estos modelos establecen la frecuencia de ocurrencia de los sismos en la zona en función de su tamaño, quedando así definido el potencial sísmico de la fuente.

- **Métodos zonificados y no zonificados**

Existen diferentes formas representar de las fuentes, en función de su geometría o de acuerdo a la caracterización de su potencial sísmico. Atendiendo al tipo de representación, podemos diferenciar cuatro tipos de fuentes:

- a) Zonas sismogénicas tipo área cuyo potencial sísmico se considera uniforme (Cornell, 1968 y Esteva, 1968);
- b) Fallas, que son las fuentes reales de la sismicidad, y se representan mediante polígonos identificados con el plano de falla;
- c) Malla de celdas regulares donde se reparte la sismicidad (Frankel, 1995);
- d) Superficie de densidad de probabilidad de ocurrencia de eventos de distintas magnitudes (Woo, 1996).

Dentro de estos cuatro grupos generales, se definen como métodos de cálculo de peligrosidad zonificados aquellos basados en zonas sismogénicas en las que la sismicidad sigue un modelo poissoniano (lo que implica la independencia temporal entre la ocurrencia de dos terremotos), y son los usados con más frecuencia en estudios de peligrosidad sísmica, considerándose los métodos clásicos para representar las fuentes sísmicas.

Alternativamente existen los denominados métodos no zonificados (Frankel, 1995; Kijko y Graham, 1999; Lapajne et al., 2003), en los que se considera que la sismicidad no está circunscrita a ninguna zona en concreto. Estos métodos son utilizados sobre todo en zonas de baja sismicidad. Entre los modelos no zonificados, cabe destacar aquellos en los que la distribución de epicentros responde a una geometría fractal, representada mediante una función kernel de suavizado que sigue una ley de potencias decreciente con la distancia al epicentro (Woo, 1996).

Alternativamente se vienen desarrollando modelos de representación híbridos, en los cuales se combinan las zonas sismogénicas con las zonas tipo falla. (Rivas Medina, 2014).

Dentro de los métodos zonificados se utilizan diferentes modelos matemáticos para predecir la pauta de comportamiento de la sismicidad esperada en un intervalo de tiempo y que determinan la

frecuencia y el tamaño de sismos que se producen en una fuente sísmica en un tiempo determinado. Estos modelos se denominan modelos o leyes de recurrencia.

Una relación de recurrencia es una ecuación que define una secuencia recursiva; cada término de la secuencia es definido como una función de términos anteriores (Lehman et al., 2010). Para simplificar los cálculos numéricos se considera que el tiempo avanza en incrementos uniformes y se organiza el modelo en forma de sistema de ecuaciones diferenciales. Parte de las ecuaciones se organizan para mostrar el valor actual de una variable en términos de los valores de una o más variables en intervalo anterior. Al resolver el modelo, los valores de una variable en un intervalo dado, serán definidos por el valor de las variables en el intervalo anterior. En el caso de la aplicación de estos modelos de recurrencia a la modelización del potencial sísmico, las variables más usadas serán la tasa de sismos de una cierta magnitud ($\dot{n}(m)$) o tasa acumulada de sismos de una magnitud igual o superior a una dada ($\dot{N}(m)$, que en algunas publicaciones se denota como $\lambda(m)$) y la proporción de sismos grandes frente a los pequeños b o β .

Entre los modelos de recurrencia que relacionan estas variables, el mas empleado en cálculos de peligrosidad es el conocido como ley de Gutenberg y Richter (1944) (GR). Esta relación establece una proporción lineal entre el logaritmo del número de sismos con magnitud mayor a una dada, y dicha magnitud, y se expresa matemáticamente como:

$$\text{Log } N = a - b * M \quad [2-2]$$

Donde:

- **N** : número de sismos con magnitud mayor que M.
- **M** : magnitud.
- **a** : ordenada en el origen.
- **b**: proporción de sismos grandes frente a los pequeños

Dado que la correcta aplicación de este modelo implica la recopilación de una gran cantidad de información en un intervalo amplio de tiempo, de cara a evitar asunciones en base a extrapolaciones que conllevarían a valores poco confiables, se han elaborado modificaciones al modelo de Gutenberg y Richter (1944), como el usado con un doble truncamiento en magnitud (M_{min} y M_{max}) propuesto por Cosentino et al. (1977). Considerando que en cada zona atendiendo a las características geológicas y las propias de las fallas existentes, habrá un terremoto de tamaño máximo posible, estos modelos establecen el número de sismos de una magnitud igual o superior a una mínima establecida ($\dot{N}_{min}$), producidos en un cierto tiempo y en una zona determinada. Suelen emplearse con dos formas funcionales diferentes (GR-modificado y GR-truncado). Otros modelos a destacar que tienen un

planteamiento similar al modelo GR pero con algunas variantes son los publicados en Main y Burton (1981), Chinnery y North (1975) o el usado en Bath (1978) y Anderson (1979).

Caracterización de la atenuación de las ondas. Se incluyen modelos de atenuación, también conocidos como ecuaciones de predicción del movimiento GMPEs (del inglés, *Ground Motion Prediction Equations*), ya descrito en el apartado 2.1. Estas leyes también suelen incluir coeficientes dependientes del tipo de suelo, que permiten la estimación del movimiento de forma aproximada incluyendo ya el efecto local.

Tras la caracterización de los elementos anteriormente descritos, la peligrosidad sísmica en un emplazamiento se calcula mediante la suma de las contribuciones a la excedencia de un cierto nivel de movimiento fuerte (movimiento de referencia), en el emplazamiento considerado, debidas a la actividad de todas las fuentes sísmicas contenidas en la zona de influencia, con sus niveles de probabilidad asociados.

Por tanto la peligrosidad como resultado de la acción de terremotos en el área de influencia, durante un período de tiempo especificado, calculará la probabilidad de que se iguale o supere un determinado nivel de movimiento del terreno.

De forma matemática, la peligrosidad H queda definida por la expresión:

$$H = P [y \geq Y; \text{ en } t \text{ años, en el emplazamiento } E] \quad [2-3]$$

Donde :

- y : parámetro de movimiento con el que expresamos la peligrosidad (habitualmente aceleración pico PGA, o aceleración espectral $SA(T)$) e Y es el valor fijado de movimiento cuya excedencia se evalúa.
- Y : nivel de movimiento cuya probabilidad de excedencia se incluye en la definición de peligrosidad en el emplazamiento E .
- t : periodo de exposición o intervalo de tiempo durante el cual se calcula la probabilidad de que se produzca, al menos, una excedencia del movimiento del terreno Y .

Lo habitual en estimaciones de peligrosidad, es suponer que el movimiento fuerte del suelo en dicho emplazamiento se rige por un proceso poissoniano, dado que se considera que la sismicidad que afecta a un emplazamiento sigue un proceso de Poisson.

En este caso, la probabilidad de que haya al menos una excedencia del parámetro de movimiento en un tiempo de exposición t , está relacionada con la tasa anual de excedencia λ o con el periodo de retorno T (la inversa de la probabilidad anual de excedencia del movimiento), mediante la expresión:

$$P_{\text{al menos 1 excedencia en } t \text{ años}} = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad [2-4]$$

La ecuación [2-5] proporciona la peligrosidad en un emplazamiento por una única fuente, dada como probabilidad anual de excedencia de un nivel del movimiento Y del parámetro y .

$$P_{\text{anual}}(y > Y) = \lambda_{\text{anual}}(y > Y) = \tau \iiint P(y > Y|m, r, \varepsilon) \cdot p(m) \cdot p(r) \cdot p(\varepsilon) \, dm \, dr \, d\varepsilon \quad [2-5]$$

Donde:

- τ : tasa anual de ocurrencia de sismos y se considera constante dentro de una misma fuente.
- $p(m)$: función de densidad de probabilidad de la magnitud dentro de cada fuente. Describe la probabilidad de que ocurra un terremoto de una determinada magnitud en la fuente sísmica y representa directamente el denominado efecto de la fuente.
- $p(r)$: función de densidad de probabilidad de la distancia. Describe la probabilidad de que si se produce un terremoto en la fuente, su foco se encuentre a una distancia r del emplazamiento de cálculo. Esta función representa la posible localización de un sismo dentro de la fuente sísmica y se relaciona con el efecto de la atenuación del movimiento a lo largo del trayecto entre la fuente y el emplazamiento.
- $p(\varepsilon)$: función de densidad de probabilidad asociada a la incertidumbre del movimiento que puede registrarse en el emplazamiento debido a un sismo determinado. Así, dadas una magnitud m y una distancia r , cabe esperar distintos niveles de movimiento dada la aleatoriedad del mismo, que se considera mediante una distribución lognormal de y en base a observaciones empíricas. El parámetro ε indica precisamente el número de desviaciones estándar que se consideran para estimar y .

- $P(y > Y | m, r, \epsilon)$: término de probabilidad que refleja si se produce o no excedencia del nivel de movimiento prefijado al calcular el movimiento esperado para unas variables m , r y ϵ determinadas. Es por tanto un término que toma dos valores: 1 cuando sí se produce excedencia y 0 en caso contrario.

$$P(y > Y | m, r, \epsilon \text{ fijos}) = 1 \quad \text{ó} \quad P(y > Y | m, r, \epsilon \text{ fijos}) = 0 \quad [2-6]$$

La integral triple se extiende al rango de variación de las tres variables (m , r y ϵ) y se resuelve numéricamente, dado que en la mayor parte de los casos no existe solución analítica. Sumando la contribución de todas las zonas se obtiene la tasa anual de excedencia del movimiento o peligrosidad sísmica expresada en términos anuales (Kramer 1996). Bajo la hipótesis de que la excedencia del movimiento es un proceso poissoniano, entonces esta probabilidad anual se traduce en una probabilidad en t años mediante la expresión ya dada en la ecuación [2.3].

Resultados de los PSHA: Espectros de peligrosidad uniforme UHS

Como resultado del estudio PSHA se derivan las curvas de peligrosidad, que se representan como estimaciones de la probabilidad de excedencia de la intensidad del movimiento esperado en el emplazamiento, a lo largo de un periodo de tiempo considerado. Estas pueden obtenerse tanto para la PGA como para diferentes $SA(T)$. A partir de estas curvas se definen los espectros de peligrosidad uniforme UHS (del inglés, *Uniform Hazard Spectrums*), fijando una probabilidad común para todas las ordenadas espectrales $SA(T)$ y deduciendo los valores que permiten construir el espectro “punto a punto”. Desagregación de la peligrosidad y determinación del sismo de control.

2.2.2.3. Desagregación de la peligrosidad: Escenarios híbridos

La desagregación del peligro sísmico es una forma eficiente de identificar combinaciones de valores de parámetros tales como la magnitud y la distancia de la fuente al sitio de interés, que contribuyen a un nivel de peligro sísmico específico (McGuire 1995; Chapman 1995; Bazzurro y Cornell 1999; Harmsen et al. 1999).

A medida que el análisis de riesgo sísmico probabilístico (PSHA) se ha vuelto más realista y completo, se ha vuelto una práctica común mostrar las contribuciones relativas a la peligrosidad de los diferentes valores de los componentes aleatorios del problema, específicamente la magnitud, M , distancia a la

fuentes, R , y una medida del número de desviaciones estándar por las cuales una aceleración espectral logarítmica observada difiere de la aceleración espectral logarítmica media predicha a partir de una relación de atenuación, ϵ (Baker et al., 2005). Los resultados, que se obtienen por separado para cada fuente y se combinan sucesivamente con todas las fuentes de la región, se denominan desagregación de la PSHA.

Los primeros métodos de desagregación computaban la contribución relativa a la peligrosidad sólo por la magnitud y distancia (desagregación 2-D) (Figura 2.4). Posteriormente, se ha puesto de manifiesto que el parámetro ϵ tiene una importancia fundamental en la desagregación.

Figura 2.4: Ejemplos de distribución de pares (Magnitud, Distancia) que contribuyen a la aceleración espectral en un periodo. Fuente: *Disaggregation of seismic drift hazard* (Baker et al., 2005).

La desagregación se lleva a cabo descomponiendo la peligrosidad total en contribuciones de sismos cuyos parámetros magnitud-distancia-épsilon pertenecen a unos intervalos (Δm , Δr , $\Delta \epsilon$) previamente especificados. La terna (m - r - ϵ) que presente una mayor contribución a la peligrosidad representa el sismo de control. Cuando la amenaza es dominada por varios eventos, la técnica de la desagregación indica que existen varias celdas (M, R, ϵ) que presentan contribuciones apreciables y todas ellas definen diferentes sismos de control. En estos casos, conviene tener en cuenta las contribuciones multimodales a la peligrosidad.

Resultados de la desagregación: espectros específicos asociados a sismos de control.

Como resultado de la desagregación de la PSHA se obtiene uno o más sismos de control que definirán los escenarios concretos caracterizados en la evaluación del riesgo sísmico. La desagregación puede realizarse para los movimientos objeto dados por los valores de las diferentes ordenadas espectrales resultantes del análisis previo de la peligrosidad y para diferentes periodos de retorno, con el fin de

Capítulo 2

encontrar los sismos que más contribuyen al corto y largo periodo. A través de una ley de atenuación, se obtienen los espectros específicos asociados a estos sismos, que representarán la acción sísmica en el cálculo del riesgo.

2.2.3 Efecto Local (Peligrosidad en suelo)

En el cálculo de peligrosidad es de vital consideración cuantificar el efecto local debido al tipo de suelo en el emplazamiento, y para ello previamente se deben determinar las profundidades y las propiedades elásticas de los depósitos sedimentarios en las zonas de estudio.

El perfil de velocidades y su geometría es una información necesaria para que geofísicos y sismólogos puedan modelar la respuesta sísmica de las cuencas sedimentarias (Luzón et al., 1995, 2004), permitiendo a su vez una evaluación detallada de la peligrosidad sísmica.

La influencia de estos factores de efecto local en la peligrosidad se incluyen a través de estudios de microzonación. Hay que resaltar que la amplificación local del suelo no afecta igual a las diferentes amplitudes del movimiento, encontrándose factores de amplificación variables para las distintas frecuencias.

Los efectos de sitio pueden llegar a tener gran influencia en este cálculo, ya que la mayoría de las grandes ciudades están situadas sobre estructuras sedimentarias que pueden provocar una significativa amplificación de las ondas sísmicas (p. e. Murphy and Shah 1988). Un ejemplo clásico de ello es el terremoto de México de 1985, de magnitud $M_w = 8.1$ que provocó la muerte de 10 000 a 40 000 personas, y destruyó más de 30 000 viviendas (Servicio Sismológico Nacional de México). Este terremoto no provocó daños graves en la zona epicentral, pero sí en puntos situados sobre los sedimentos lacustres de Ciudad de México, a casi 400 km, que sufrieron grandes amplificaciones en periodos en torno a 3s. (Singh et al., 1988; Chávez-García et al., 1994)

De igual manera, se han estudiado extensamente la relación entre los valores de V_s^{30} y la distribución de daños en terremotos, como el ocurrido en Dinar (Turquía) con $M_s=6.1$, acaecido el 1 de Octubre de 1995, causando 90 víctimas mortales y destruyendo más de 4000 edificios. (Ismet Kanli et al. 2006).

Especialmente importantes en cuanto a la relevancia del efecto local, son el terremoto de Northridge (California, Teng and Aki, 1996) del 17 de enero de 1994, $M_w = 6.7$, que pasa por ser el más costoso en la historia de Estados Unidos o en el terremoto de Kobe de 1989 ($M_w = 6.8$, Toki et al. 1995), el más destructivo en Japón desde 1923.

Si bien tradicionalmente los estudios de peligrosidad sísmica a escala regional se realizan en emplazamientos genéricos situados en roca y no tienen en cuenta la influencia de la geología superficial en el movimiento del terreno, al considerar una escala local, las condiciones geológico-

geotécnicas, hidrológicas y topográficas del terreno son las que, principalmente, controlan el grado y la distribución de la intensidad y, por tanto, del daño sísmico.

Los estudio de terremotos que han afectado a zonas urbanas han permitido constatar que existe una amplificación de las ondas sísmicas (en un rango de frecuencias) en terrenos blandos, sobre todo en casos de gran potencia, en relación a las registradas en roca dura, fenómeno conocido como efecto local ó de sitio.

Los suelos blandos presentan frecuencias propias de baja magnitud, y por tanto tienden a amplificar más las frecuencias de este orden, filtrando en cambio las altas frecuencias del movimiento. Por ello, los factores de amplificación de estos suelos son mayores para aceleraciones espectrales de baja frecuencia o para el desplazamiento y la velocidad pico, de menor contenido frecuencial que la aceleración pico, PGA. (B. Benito y E. Jimenez, 1999).

La distribución de los daños que causa un terremoto en un emplazamiento está fuertemente ligado a las características dinámicas del suelo, y por tanto al efecto local, sobre todo en el rango de periodos que coincide con el periodo de vibración de las estructuras dañadas (Navarro et al., 2000, 2005, 2007). Ejemplos de esta íntima relación, fueron estudiados por Wood (1908) en relación al terremoto ocurrido en San Francisco en 1906.

Cuantificación del efecto local

Dado que el efecto local depende primordialmente de las propiedades locales del terreno (García Jerez, 2010), y que a escala local y/o urbana, estas propiedades pueden tener una extensa variabilidad, se precisa de métodos de elevada fiabilidad para poder proceder con una determinación detallada y, que permitan determinar la estructura del suelo en un emplazamiento dado o, al menos, la caracterización de su respuesta ante la acción de ondas sísmicas (función de transferencia).

En múltiples ocasiones, como sería el caso de los terremotos históricos, no es posible realizar las medidas instrumentadas que serían necesarias para determinar el efecto local, por lo que en dichos casos se utilizan técnicas de análisis más simples, que permiten correlacionar los daños observados con la distribución de los efectos de sitio.

A continuación se describen diferentes técnicas, basadas en métodos sísmicos, utilizadas para la determinación del efecto local.

2.2.3.1. Funciones de transferencia 1-D y periodos predominantes

La función de transferencia es la respuesta del terreno, en el dominio de la frecuencia, a la acción sísmica. El contenido frecuencial y las amplitudes definen como se modifica la acción sísmica debido a las condiciones del terreno. El período correspondiente a la frecuencia de máxima amplitud se denomina período predominante (p.e. Navarro et al, 2013)

A continuación se describen los métodos sísmicos actualmente más utilizados.

- Método clásico de razón espectral

Para determinar el efecto local en un emplazamiento se realiza la comparación entre los registros sísmicos registrados simultáneamente en el emplazamiento y en el basamento o un afloramiento rocoso cercano (ecuación 2-11). El método consiste en calcular el cociente (función de transferencia) entre los espectros de Fourier de los registros en suelos sedimentarios (usualmente en la componente horizontal) y los correspondientes en roca, considerado como punto de referencia (Borcherdt, 1970). Si el punto de referencia está suficientemente próximo al emplazamiento, esta operación elimina idealmente los efectos de fuente y de camino, que son factorizables en el dominio de la frecuencia (Figura 2.5). Algunas aplicaciones de esta técnica pueden encontrarse en los trabajos de Borcherdt and Gibbs (1976), Chávez-García et al. (1990), Frankel et al. (2001) y Satoh et al. (2001a).

Figura 2.5: Representación esquemática de efectos de fuente, camino y sitio para el basamento y para un punto situado sobre sedimentos. El efecto de sitio se puede estimar como el cociente espectral entre los registros en sedimento y los registros en roca: $S_{sitio}(\omega) = S_{sedimento}(\omega) / S_{basamento}(\omega)$. (García-Jerez, 2010).

$$\frac{S_{\text{sedimento}}(\omega)}{S_{\text{basamento}}(\omega)} = \frac{S_{\text{fuente}}(\omega) \times S_{\text{camino}}(\omega) \times S_{\text{sitio}}(\omega) \times R(\omega)}{S_{\text{fuente}}(\omega) \times S_{\text{camino}}(\omega) \times R(\omega)} = S_{\text{sitio}}(\omega)$$

[2-7]

▪ Método de Nakamura o HVSR

Este método, conocido comunmente como método de Nakamura (1989), método H/V o HVSR (del inglés, *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*), permite determinar el período predominante del terreno a partir del cociente espectral entre la media de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales $H(\omega)$ y el espectro de amplitud de Fourier de la componente vertical $V(\omega)$ de los registros simultáneos de ruido ambiental en superficie. El cociente espectral $H(\omega)/V(\omega)$ se corresponde con la función de transferencia de los niveles superficiales del terreno sometidos a movimientos superficiales (Nakamura, 1989)

Esta técnica ha sido empleada extensivamente en las últimas décadas, dada su economía en dispositivos y requerimientos logísticos, ya que sólo se necesita obtener un registro en tres componentes del ruido ambiental por cada punto investigado (García-Jerez et al., 2006a)

La Figura 2.6 muestra una comparación de funciones de transferencias obtenidas mediante el método de coeficiente espectral, usando registros simultáneos de terremotos, y el método HVSR usando registros de ruido ambiental en ciudad de Lorca. (Navarro et. al. (2013)

Figura 2.6. Comparación de funciones de transferencia obtenidas por el método clásico de coeficiente espectral (en rojo) y por el método HVSR con ruido ambiental (en azul) en dos estaciones de ciudad de Lorca. (Navarro, et. al, 2013).

2.2.3.2. Determinación de la estructura Vs30

A partir de la clasificación NEHRP (1993), el valor Vs30 ha sido adoptado en varios códigos sísmicos de Ingeniería Civil (e.g. NCSE-2002; Eurocódigo-8 (EC8)) como un parámetro representativo de la respuesta sísmica del terreno, a pesar que para estructuras sedimentarias profundas dicho valor puede ser insuficiente para identificar la respuesta del terreno ante una sacudida sísmica en términos de períodos predominantes y factores de amplificación (p.e. García-Jerez et al, 2017) .

A continuación se describen de forma muy breve algunos de los métodos comúnmente utilizados para el cálculo de la estructura de velocidad del terreno.

- Método activo de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

Los métodos activos usan una fuente conocida de generación de ondas sísmicas, las cuales dependen del método a utilizar. Frente a los métodos tradicionales de sísmica de reflexión y refracción, basados en el cálculo de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas generadas por una fuente artificial conocida (golpe, microexplosiones, etc) y posterior cálculo directo de la velocidad de las ondas sísmicas en el medio de propagación, el método MASW (Park et al 1999) está adquiriendo una amplia notoriedad en el cálculo de la estructura superficial del terreno.

Este método se basa en el cálculo de la estructura superficial del terreno en términos de Vs a partir de la inversión de las curvas de dispersión de ondas Rayleigh (Rg) generadas artificialmente. Esto permite obtener un perfil 1-D de velocidad de la onda S (función Vs versus profundidad) en el centro de una extensión lineal de geófonos (p.e. Sandoval -Castaño et al 2011; Martínez-Pagan et al, 2014).

Figura 2.7: Instrumentación y trabajo de campo para la aplicación del método MASW en ciudad de Lorca, realizado por Martínez-Pagán et al. (2014).

Figura 2.8. Ejemplo de estructura 2-D en la ciudad de Lorca (Calle Granada) obtenida a partir del método MASW. a) Distribución de valores VS30 a lo largo del perfil; b) Estructura 2-D de velocidad VS (Martínez_Pagán et al 2014).

- Métodos pasivos

Los métodos pasivos se basan en la determinación de la estructura superficial del terreno a partir de registros de ruido ambiental. El ruido ambiental está integrado por vibraciones del terreno de pequeña amplitud (del orden de varios micrometros) producidas por fenómenos naturales (frentes atmosféricos, reacciones geotérmicas, olas marinas etc) y/o fuentes artificiales (tráfico, maquinaria pesada, etc.). Las vibraciones que tienen frecuencias f mayores de 1 Hz son denominadas normalmente ruido ambiental (microtremores) y aquellas con $f < 1$ Hz se identifican con microsismos.

En las últimas décadas se ha experimentado un aumento del uso de métodos pasivos que utilizan el ruido ambiental como fuente de excitación sísmica, debido a la fuerte relación existente entre las características de éste y el comportamiento dinámico fundamental de las capas más superficiales del terreno. No obstante, estos métodos necesitan de sistemas de adquisición y análisis de datos más complejos que los métodos tradicionales, ya que existe una mayor incertidumbre en la ubicación y características de las fuentes.

Básicamente, estos métodos se basan en el cálculo de las curvas de dispersión de las ondas superficiales contenidas en el ruido ambiental (Figura 2.21) y posterior determinación de la estructura de velocidad VS (Figura 2.22) a partir de técnicas de inversión.

Algunos de estos métodos son:

- El método de autocorrelación espacial (SPAC) en sus diferentes variantes (Aki, 1957, 1969; Okada and Matsushima, 1989; Bettig et al., 2001; Köhler et al., 2007).
- El método f-k (frecuencia-número de onda) y sus variantes (p. e. Capon 1969).
- Método ReMi ("Refraction Microtremor", Louie, 2001).
- Otros métodos de análisis de ondas Rayleigh en la componente vertical mediante array circular (Henstridge, 1979; Cho et al. 2006a; Tada et al., 2007).
- Métodos de array circular para ondas Love distintos del 3c-SPAC: métodos "Two radius" (TR, Tada et al., 2006), "Double Ring" (DR, García-Jerez et al. 2006b, 2008a), "Single Circular Array" (SCA, García-Jerez et al. 2008b, 2010), SPAC₂L y "Centerless Circular Array for Love waves" (CCA-L, Tada et al., 2009).
- La extracción de funciones de Green entre parejas de estaciones mediante correlación cruzada (Shapiro and Campillo, 2004), que ha sido testeada a escala geotécnica por Picozzi et al. (2009).

La principal causa que ha llevado a la implantación exitosa de este tipo de técnicas se justifica por su sencillez de aplicación, al utilizar fuentes pasivas que son las vibraciones ambientales, por lo que no se

trata de técnicas invasivas ni destructivas. A partir de su aplicación es posible, a un coste bastante inferior respecto a otros métodos invasivos, obtener las características de las capas sedimentarias (velocidad de cizalla versus espesor de las capas del terreno).

Figura 2.9. Ejemplos de curvas de dispersión de ondas Rayleigh obtenidas a través del método SPAC en Lorca (Navarro et al, 2014).

Figura 2.10. Ejemplos de modelos de velocidad de cizalla obtenidos en la ciudad de Lorca a partir del método SPAC (Navarro et al, 2014).

- Métodos “proxy”

Método del Gradiente topográfico

Recientemente se ha propuesto el método del gradiente topográfico (Wald y Allen 2007; Allen y Wald 2007, 2009) como un método alternativo y de bajo coste para la estimación del valor de VS30 del terreno. Este método tiene su principio en el hecho de que los materiales más competentes (alta velocidad de ondas sísmicas) son más propensos a mantener pendientes fuertes, mientras que los sedimentos con baja rigidez y por lo tanto de baja velocidad de ondas sísmica se depositan principalmente en el fondo de la cuenca. Las características geomorfológicas de la superficie están disponibles para todas las zonas del mundo a través de modelos digitales del terreno (MDT) de gran calidad para la comunidad científica y técnica, sean o no zonas sísmicamente activas.

Figura 2.11. Clasificación del terreno en la ciudad de Lorca obtenido a partir del método del gradiente topográfico en la ciudad de Lorca (Prez-Cuevas, 2015).

2.2.3.3. Clasificación del suelo a partir de la V_s 30

Una vez obtenido el parámetro V_s , se podrán clasificar las estructuras superficiales del suelo en familias con similar respuesta sísmica, lo que permite una comparación entre la intensidad sísmica y el factor de amplificación, ambos parámetros caracterizados por la velocidad de ondas S.

El sistema de clasificación de suelos más común en ingeniería de suelos de los Estados Unidos de América es el Sistema de Clasificación de Suelo unificado, USCS por su acrónimo en inglés. El USCS tiene tres grupos de clases de suelo principales y de los que se deriva posteriormente la clasificación dada por el conocido programa de reducción de amenaza sísmica NEHRP (del inglés, *National Earthquake Hazards Reduction Program* (FEMA-440), desarrollado en los Estados Unidos, pero estandarizado y adoptado por otros códigos internacionales, modelos y metodologías dentro de la estimación de la peligrosidad y el riesgo sísmico a nivel mundial. Estas clases son:

- Suelos de grano grueso (por ejemplo, arenas y gravas): se distingue principalmente porque los granos son observables a simple vista.
- Suelos de grano fino (por ejemplo, limos y arcillas): son buenos y algunos no almacenan agua, retienen agua mejor que los granos superiores.
- Suelos altamente orgánicos.

Por otra parte, la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) propone que se determinen los espesores e_1 , e_2 , e_3 y e_4 de terrenos de los tipos I, II, III y IV respectivamente, existentes en los 30 primeros metros bajo la superficie para obtener el valor del coeficiente de terreno “C” de cálculo.

Son numerosos los trabajos que permiten una clasificación de suelos basada en la V_s , a continuación se mencionan los más importantes:

- Medvedev (1962) asoció los valores de amplificación del movimiento del terreno al contraste de impedancia entre las diferentes interfases. Las zonas con altos contrastes de velocidades entre las interfases dan altos valores de amplificación para unos períodos determinados, mientras que zonas con contrastes bajos de velocidades dan valores bajos de amplificación para períodos no muy bien determinados.
- Tiedemann (1992) propuso una forma rápida y aproximada de ver el efecto amplificador de terrenos suelos subyacentes de espesor considerable, clasificando los suelos en familias de propiedades similares ante la excitación dinámica, según la experiencia obtenida en un gran número de terremotos pasados. A la vez, propuso una correlación de la velocidad de las ondas

S (β_s) y la amplificación aproximada de la sacudida y de la intensidad (MM) con respecto a la correspondiente para terreno duro.

- Borchardt et al (1991) y Borchardt (1994) elaboró un método para determinar de forma aproximada el incremento de la intensidad en función de la amplificación espectral horizontal promedio AEHP obtenido de registros de movimientos débiles y fuertes, mediante la expresión:
 $\Delta I = 0.27 + 2.7 \log (AEHP)$ (Tabla 2-1).

Tabla 2-1: Clasificación del terreno propuesta por Borchardt, 1994.

Clase de Suelo	Descripción	V _{s30} (m/s)	Espesor (m)
SC-Ia	Roca dura	1620 - 1400	-
SC-Ib	Rocas firme a dura.	1400 - 700	-
SC-II	Suelos pedregosos y roca de blanda a firme.	700 - 375	10
SC-III	Arcillas consistentes y suelos arenosos	375 - 200	5
SC-IVa	Suelos blandos.	200 - 100	3
SC-IVb	Suelos muy blandos con estudios especiales.	-	3

- NCSE-02 clasifica los distintos tipos de terrenos en función de las características de los 30 primeros metros, la velocidad de las ondas S y P en ensayos de penetración estáticos o dinámicos para terrenos granulares, los valores de resistencia a compresión simple para terrenos cohesivos y su coeficiente del terreno, C, característico (Tabla 2-2).

Tabla 2-2: Clasificación del terreno propuesta por la NCSE-02

TIPO DE TERRENO	DESCRIPCIÓN	COEFICIENTE C	V _{s30} (m/s)
I	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso.	1,0	> 750
II	Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros.	1,3	750 - 400
III	Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a mu firme.	1,6	400 - 200
IV	Suelo granular suelto o suelo cohesivo blando.	2,0	< 200

- NEHRP, 2003 (National Earthquake Hazards Reduction Program) clasifica los terrenos en función de la Vs en los primeros 30m (100 pies) y, para calcular los factores de amplificación (Fa) a partir del terremoto de Loma Prieta 1989, el cual proporciona abundantes datos de movimiento fuerte que se utilizaron junto con las disposiciones de 1994 para obtener los coeficientes de amplificación (
- Tabla 2-3).

Tabla 2-3: Clasificación de los materiales geológicos y susceptibilidad de amplificación del NEHRP (2003).

Clase de Suelo	Pre-1994	Características	Susceptibilidad a la amplificación	Su (kPa)	V _{S30} (m/s)
A	S1	Roca dura	No	-	> 1500
B		Roca	Baja	-	760 < V _{S30} ≤ 1500
C	S1-S2	Suelo muy denso y roca suave	Moderada	>100	360 < V _{S30} ≤ 760
D		Suelo firme	Moderada-Alta	50-100	180 ≤ V _{S30} ≤ 360
E	S3-S4	Suelo blando	Alta	<50	V _{S30} < 180
F		Suelos blando específico	Muy alta	-	-

- SISMOSAN (2007): el estudio sobre la Caracterización Geotécnica y Análisis del Efecto Local realizado por SISMOSAN (2007) propone una división geológica regional y local de los materiales superficiales según la capacidad de amplificación sísmica teniendo en cuenta las características geológicas y geotécnicas de los mismos y también la naturaleza del sustrato (Tabla 2-4).

Tabla 2-4: Clasificación de suelos propuesta por SISMOSAN (2007).

Clase de Suelo	Características	V _{S30}
I (A)	Rocas de dureza alta y muy alta poco fracturadas.	> 1500 m/s
I (B)	Rocas de dureza alta y media, fracturadas. Intercalación de rocas de diferente dureza.	1500-750 m/s
II	Rocas de dureza media mu fracturadas y en ocasiones con abundantes intercalaciones de rocas de dureza baja. Rocas blandas con arcillas expansivas.	750-400 m/s
III	Suelos no cohesivos poco o puntualmente cementados.	400-200 m/s
IV (A)	Suelos no cohesivos sueltos y cohesivos blandos.	200-150 m/s
IV (B)	Suelos muy blandos, en ocasiones potencialmente licuefactables.	< 150 m/s

- EUROCÓDIGO 8: define cinco tipos de terrenos, que pueden ser empleados para tener en cuenta la influencia de las condiciones locales del terreno, en caso de una acción sísmica (Tabla 2-5).

Tabla 2-5. Clasificación del terreno del Eurocódigo 8.

Tipo de terreno	Características	V _{S30} (m/s)	N _{SPT}	Cu (kPa)
A	Roca	> 1500	-	-
B	Depósitos de arena muy densa, gravas, o arcilla muy dura	360-800	>50	>250

C	Depósitos profundos arena densa o de densidad media	180 -360	15-50	70-250
D	Depósitos de suelo suelto de cohesión media a no cohesivo	< 180	<15	<70
E	Capa aluvial superficial con valores de Vs de tipo C o D			
S ₁	Suelos blandos específico	< 100	-	10-20
S ₂	Suelos licuefactables			

Distintos códigos sísmicos, como NERHP (2003; 2009), EUROCODE 8, NSCE-02 proponen factores de amplificación a través de funciones de transferencia estandarizadas para distintos tipos de suelo basados en la velocidad de cizalla (V_s) a una profundidad de 30 metros. Este tipo de procedimiento permite una simplificación para la caracterización del efecto local. Ejemplos de estos factores se muestran en la Figura 2.12 y Tabla 2-6.

Figura 2.12: Estimaciones empíricas de los coeficientes de sitio F_a y F_v como una función de la velocidad de onda de cizalladura media para un pico de entrada de aceleraciones de tierra sobre roca igual a aproximadamente 0,1 g. Fuente: FEMA-450.

Tabla 2-6: Comparativa de los factores de amplificación reflejados en el SISMOSAN, RISMUR, EUROCODE Y NCSE-02.

SISMOSAN		RISMUR		EC-8		NCSE-02	
Suelo	Amplificación	Suelo	Amplificación	Suelo	Amplificación	Suelo	Amplificación
I (A)	0.8 – 0.83	I	0.9	(A)	(1.0)	(I)	0.8 – 0.83
I (B)	0.8 – 0.83	IIa	1	A	1.0	I	0.8 – 0.83
II	1.0	IIb	1	B	1.2	II	1.0
III	1.0 – 1.3	IIIa	1.3	C	1.2	III	1.3 – 1.24

2.3 VULNERABILIDAD DE LOS EDIFICIOS

2.3.1. Introducción

Durante un terremoto, la energía fluye del suelo a las estructuras y estas deben disiparla mediante los mecanismos de amortiguamiento en el rango elástico y mediante las deformaciones plásticas, siendo estas últimas las responsables de los daños permanentes en las estructuras y los edificios.

La vulnerabilidad se puede precisar como la fragilidad de una edificación frente a una acción sísmica determinada. Mas concretamente, la vulnerabilidad sísmica de una estructura, o de una zona urbana, se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico y está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño (Barbat, 1998). Dicha vulnerabilidad dependerá primordialmente de las características constructivas de la edificación.

El concepto de vulnerabilidad global (Wilches-Chaux 1989) considera la vulnerabilidad no sólo en cuanto a su dimensión física, sino incluyendo otros aspectos como el impacto en dimensiones diversas, por ejemplo la económica, social, ambiental, etc.

La vulnerabilidad sísmica de una edificación se expresa por un conjunto de parámetros capaces de predecir el tipo de daño estructural, el modo de fallo y la capacidad resistente de la estructura bajo unas condiciones probables de sismo. Ésta se asigna a través del análisis de las tipologías constructivas en el sitio según las clasificaciones de vulnerabilidad descritas en las metodologías existentes para la evaluación del riesgo sísmico.

Para la estimación de daños existen diferentes metodologías, basadas en el uso de curvas de fragilidad, matrices de probabilidad de daño, relaciones entre índices de vulnerabilidad e índices de daño, espectros de capacidad y demanda, etc. En todas ellas, el objetivo es estimar el porcentaje de cada grado de daño, para cada clase de vulnerabilidad, ante un cierto parámetro de movimiento.

2.3.2. Metodologías

Una gran variedad de metodologías y técnicas para la estimación y asignación de la vulnerabilidad sísmica de las diferentes tipologías constructivas han sido propuestas por diversos autores (Caicedo et al., 1994). La selección de una determinada metodología está íntimamente relacionada con la escala de análisis y las características de los elementos a estudiar, lo que ha llevado a algunos investigadores a proponer diferentes clasificaciones como un esfuerzo para sistematizar las metodologías existentes.

Una de las clasificaciones más conocidas es la de Corsanero y Petrini (1990), quienes agrupan las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad en función del tipo de resultado que producen en: *Técnicas directas*, las cuales permiten predecir directamente el daño causado por un sismo (subdivididas a su vez en métodos tipológicos (Whitman et al., 1974) y métodos analíticos D'Ayala (1997) y Calvi (1999).); *Técnicas indirectas*, que determinan un índice de vulnerabilidad y relacionan el daño con la intensidad sísmica (Yépez, 1996); *Técnicas Convencionales*, que introducen un índice de vulnerabilidad independiente de la predicción del daño (ATC-13 (ATC, 1985)) y *Técnicas híbridas*; que combinan elementos de los métodos anteriores con juicio de expertos.

Más adelante, Dolce et al. (1994) propone una clasificación sobre la base de la anterior, considerando tres tipos de métodos: *Métodos estadísticos*, basados en un análisis estadístico de las edificaciones; *Métodos Mecánicos*, en los cuales se estudian los parámetros que rigen el comportamiento dinámico de las estructuras y *Métodos basados en juicios de expertos*, que evalúan cualitativa y cuantitativamente los factores que gobiernan la respuesta sísmica de los edificios.

Otra clasificación, propuesta por Kappos (Dolce et. al 1994), agrupa los métodos en función de la fuente de información, en tres tipos: *Métodos empíricos*, basados en la experiencia sobre el comportamiento de tipos de edificaciones durante sismo; *Métodos analíticos*, que evalúan la resistencia estimada de las estructuras a los movimiento del terreno en base a modelos mecánicos características mecánicas de las estructuras y *Métodos experimentales*, que recurren a ensayos “in situ” para determinar las propiedades dinámicas, interacción suelo-estructura, incidencia de elementos no estructurales, etc.

Barbat et al. (1998) sugiere que el resultado de un estudio de vulnerabilidad sísmica se relaciona con la descripción del daño y el movimiento sísmico, y que la relación de estos puede formularse discretamente, mediante matrices, o de manera continua, mediante curvas y funciones propias que reflejen los aspectos constructivos de la región de estudios. En base a esto, el autor clasifica la vulnerabilidad según la obtención de estas funciones, en: *Vulnerabilidad calculada*, cuando las curvas

se obtienen analíticamente simulando la respuesta de las estructuras de una misma tipología y *Vulnerabilidad observada*, cuando se obtienen de manera empírica a través de la observación de daños en edificaciones de zonas afectadas por terremotos.

Según los criterios de clasificación descritos, destacan dos métodos generales: los métodos empíricos y métodos analíticos. Los primeros implican análisis estadísticos de datos sobre distribuciones de daños observados en terremotos pasados que dan información del desempeño sísmico de los edificios expuestos. Los métodos analíticos utilizan expresiones derivadas mecánicamente para describir la capacidad de los edificios para soportar la demanda sísmica y la probabilidad de que puedan experimentar diferentes grados de daño.

Dos metodologías que combinan ambos métodos y que son ampliamente utilizadas por su aplicabilidad a otros países son las metodologías HAZUS-MH (2003) y Risk-UE (Risk-UE, 2003; Mouroux et al., 2004).

La metodología HAZUS-MH, basada en la ATC-40, fue desarrollada inicialmente en Estados Unidos por la Federal Emergency Management Agency (FEMA/NIBS, 1999). Esta herramienta metodológica surge como una necesidad de predecir los efectos causados por desastres naturales como son los terremotos.

Para la aplicación metodológica de lo establecido en HAZUS-MH, se debe partir de extensas bases de datos que recojan previamente la caracterización a nivel estructural de los distintos edificios y estructuras presentes en la zona de estudio, para en conjunto con las solicitudes de origen sísmico poder finalmente establecer la estimación del nivel de daño en los edificios y estructuras consideradas, así como las víctimas estimadas y la predicción de las pérdidas económicas. Por tanto HAZUS-MH propone no solo una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sino una metodología completa para la evaluación del riesgo sísmico.

Para el análisis de la vulnerabilidad sísmica, la metodología HAZUS-MH (2003), se basa en los métodos propuestos en la ATC-38 (ATC-2000) y los métodos analíticos desarrollados en la ATC-55 (ATC-2005).

Por otro lado, el principal objetivo del proyecto Risk-UE fue 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 proyecto tuvo la virtud de involucrar a las autoridades municipales con responsabilidad en la protección civil y en la gestión del riesgo y se aplicó a 7 ciudades europeas (Barcelona, Bucarest, Catania, Sofía, Bitola, Thessaloniki y Niza).

2.3.2.1. Métodos empíricos

Los métodos empíricos se basan en el hecho de que ciertas clases de estructuras que comparten características estructurales y patrones de carga similares se comportan de la misma manera y sufren tipos de daños similares ante la ocurrencia de terremotos. Estos métodos suelen utilizar la intensidad macrosísmica para caracterizar el movimiento, lo que supone un cierto problema. En las estimaciones actuales de peligrosidad el movimiento suele caracterizarse en términos de aceleración pico (PGA) y/o espectrales SA(T) y el empleo de métodos empíricos requiere entonces conversiones entre la intensidad y la aceleración, empleando correlaciones con alto grado de incertidumbre.

El método empírico mas empleado en Europa es el basado en la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) (Grünthal, 1998)., cuya primera versión fue propuesta en 1992, dando lugar a la escala EMS-92. Sin embargo fue en 1998, cuando fueron introducidas las principales innovaciones. Actualmente esta escala es utilizada como estándar para la medición de la actividad sísmica y de su intensidad en los países europeos.

Básicamente, la EMS-98 es una escala de intensidad macrosísmica usada para evaluar la fuerza de los movimientos sísmicos basándose en los efectos destructivos en las construcciones y en el cambio de aspecto del terreno, así como en el grado de afectación sobre la población.

La EMS-98 se basó principalmente en las escalas macrosísmicas: 1) MCS: escala Mercalli-Cancani-Sieberg, 2) MSK : escala Medvédev-Sponheuer-Kárník, 3) MM-31 y MM-56: escala modificada de Mercalli y 4) GEOFIAN (Medvedev, 1953)

Uno de los grandes avances de esta escala es la introducción de la Tabla de Vulnerabilidad, que permite tratar distintos tipos de edificios y la variedad en sus rangos de vulnerabilidad con un solo esquema.

Figura 2.13: Diferenciación de estructuras en clases de vulnerabilidad. Tabla de Vulnerabilidad. Fuente: EMS-98.

Por otra parte, la escala EMS-98 establece que el daño sigue una distribución de probabilidad de tipo binomial, distribución que permite completar matrices de probabilidad de daño que están definidas, de forma parcial o incompleta, en la descripción de los grados de intensidad.

Chávez (1998), calibró matrices de probabilidad de daño para las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98. Analizando distintos modelos de distribución de probabilidad, incluyendo las distribuciones normal y de poisson, confirmó que la distribución de probabilidad binomial es la apropiada, y realizó un ajuste de matrices de vulnerabilidad de daño con los datos disponibles empleando técnicas de extrapolación para completar las intensidades sísmicas con información escasa o parcial (Lantada, 2007).

Otras metodologías conocidas que emplean como base la EMS-98 son la metodologías HAZUS-99 (FEMA/NIBS 1999), basada en la ATC-38 (ATC 2000), que utiliza datos de observaciones de daños asociados a terremotos importantes ocurridos en el pasado en los Estados Unidos de América y la metodología RISK-UE (Método 1) (Mouroux and Lebrun, 2006) desarrollada con datos de las 7 ciudades europeas participantes en el proyecto. Concretamente dentro del Método 1 de RISK-UE, la función de distribución de probabilidad se obtiene a partir de la distribución beta, caracterizada por el grado de

daño medio. Dicho parámetro se obtiene como función de la intensidad del movimiento (EMS-98) y un único índice de vulnerabilidad.

2.3.2.2. Métodos analíticos

Los métodos analíticos para caracterizar la vulnerabilidad y la evaluación de los daños son los mas apropiados para estimar el daño cuando el movimiento del suelo se expresa en términos de aceleraciones espectrales $S_a(T)$ y desplazamientos espectrales S_d . Este procedimiento para la estimación del daño físico utiliza fórmulas derivadas mecánicamente para describir la capacidad de desplazamiento de las edificaciones para cuatro estados límites diferentes. Estas ecuaciones se dan en términos de las propiedades geométricas y de los materiales, incluyendo la altura media de los edificios en cada clase. Tras sustituir esta altura usando una fórmula que la relaciona con el periodo correspondiente al estado límite, se pueden establecer funciones de capacidad del desplazamiento en términos del periodo. La principal ventaja es que, de esta forma, se puede establecer una comparación directa para cualquier periodo entre la capacidad de desplazamiento de una edificación y la demanda en desplazamiento predicha a partir de un espectro de respuesta.

En estos métodos, el comportamiento de cada edificio está representado por una curva de capacidad que se refiere a su desplazamiento lateral con diferentes aceleraciones de base. Para obtenerlas se aplica un análisis estático no lineal en los cuales el modelo de la estructura considera las propiedades no lineales de la curva de la relación fuerza-deformación debidas a la respuesta inelástica del material.

La curva de capacidad es una gráfica de la resistencia a carga lateral del edificio expresada como una función del desplazamiento lateral característico. Normalmente la curva de capacidad se construye graficando la fuerza cortante en la base del edificio contra el desplazamiento en el techo (Freeman 1988). Para obtener esta curva se realiza un análisis de carga lateral donde el modelo de la estructura considera las propiedades no lineales de la curva de la relación fuerza-deformación debidas a la respuesta inelástica del material (análisis estático no lineal); este análisis se conoce en inglés como "pushover" (Lawson et al 1994)(**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Las cargas laterales se distribuyen en proporción al primer modo de vibración de la estructura, y su magnitud se va aumentando poco a poco. Según aumentan las cargas se detecta la formación de rótulas plásticas en los elementos y la consiguiente pérdida de rigidez, por lo que las curvas de capacidad no son líneas rectas. Para la estimación del daño mediante métodos analíticos, la curva de capacidad se convierte a un gráfico de aceleración espectral contra desplazamiento espectral, conocidos como espectros de capacidad. Para hacer la conversión se usan la ecuación [2-13] y ecuación [2-14], las cuales expresan

Capítulo 2

el desplazamiento espectral S_{di} en términos del desplazamiento en el techo Δ_{roof} y la aceleración espectral S_{ai} en términos de la fuerza cortante en la base V_i .

$$S_{di} = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad [2-8]$$

$$S_{ai} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad [2-9]$$

Para una tipología constructiva dada, las curvas de capacidad están vinculadas a las curvas de fragilidad, que representan la probabilidad de que el edificio sufra diferentes grados de daño. Estas curvas de fragilidad se modelan con una distribución logarítmica normal probabilística.

Sin embargo, existe un grado de incertidumbre importante en la elección de las curvas que representen el comportamiento de los edificios, por el hecho de que éstas son realizadas para un modelo de edificios con características estructurales, diseño y materiales de construcción similares, pero que dependen de la geometría y métodos constructivos, y estos pueden variar de un edificio a otro dentro de una misma tipología estructural.

Entre las metodologías avanzadas más empleadas actualmente, basadas en métodos analíticos, caben citar el Método 2 de la metodología RISK-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), donde se desarrollaron curvas de capacidad y fragilidad para edificaciones características de los 7 países participantes en el proyecto y la metodología HAZUS MH (2003) (ATC-40), donde se presenta una base de datos de las edificaciones y tipologías constructivas características de Estados Unidos y otros países americanos, a la vez que se presentan los parámetros de las curvas de capacidad y fragilidad desarrollada para las mismas. En ambas metodologías se clasifican las edificaciones por sus características estructurales, por altura y por su nivel de diseño sismorresistente.

2.4 CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO

Como resultados del estudio de riesgo sísmico se obtienen diferentes parámetros representativos del daño físico y del grado de pérdidas humanas y materiales que previsiblemente causarán los terremotos cuya acción sísmica se ha determinado previamente, que caracterizan lo que denominamos escenarios de daño.

El daño en las estructuras debido a movimientos sísmicos es causado por la fatiga de los materiales y las deformaciones de los elementos que componen la estructura. Este daño asociado a la fatiga, se relaciona con la energía disipada durante el sismo.

La cuantificación del daño dependerá del método de caracterización de la vulnerabilidad elegido. En el caso de utilizar métodos empíricos basados en la EMS-98, la cuantificación del daño estará dada por las matrices o funciones de probabilidad de daño. De estas se extraen directamente las probabilidades de daño que sufrirán las estructuras de acuerdo a su clase o índice de vulnerabilidad y a la intensidad del movimiento generado (Figura 2.14). La definición de los grados de daño estará dada por los estados de daño definidos en la EMS-98. Esta escala describe 6 estados de daño, que van desde el Daño 0 al Daño 6, que representan los porcentajes de daño nulo o edificios sin daño, daño leve, moderado, fuerte, muy fuerte y colapso, respectivamente.

Figura 2.14. Gráfico con las probabilidades de distinto tipo de daño que puede esperarse en las clases de vulnerabilidad A, según la EMS-98 y matriz de probabilidad de daño de Chávez (1998), para diferentes acciones sísmicas dadas en Intensidad macrosísmica.

En el caso de utilizar métodos analíticos, para determinar el daño que sufrirán las estructuras se combina la acción sísmica (espectros específicos obtenidos del estudio de peligrosidad) y la

vulnerabilidad de las estructuras representada por los espectros de capacidad descritos en el apartado anterior.

Para determinar el comportamiento de la estructura y las probabilidades de daño se utilizan los métodos capacidad-demanda. Estos métodos se fundamentan generalmente en la superposición del espectro de demanda con el espectro de capacidad de la estructura para la obtención del punto de desempeño.

Existen diversos métodos para determinar el punto de desempeño y, por tanto, el desplazamiento espectral máximo en las estructuras para una acción sísmica dada (Fajfar y Gaspersic, 1996; Fajfar, 2002; ATC-40, 1995; ATC-55, 2005). A continuación se citan los métodos de capacidad-demanda (procedimientos estáticos no lineales) más reseñables desarrollados por la *Applied Technology Council* (ATC) y recogidas en los códigos FEMA-356, ATC-40, FEMA-440 y ASCE / SEI 41-06. Tienen en común que requieren el desarrollo de la curva “push-over” descrita en el apartado 2.3.2.2.

- Displacement Coefficient Method (DCM): desarrollado en el código FEMA-356, se fundamenta en estimar el máximo desplazamiento de un sistema no lineal como el máximo desplazamiento de un sistema elástico multiplicado por una serie de coeficientes.
- Improved Displacement Coefficient Method (I-DCM): este método, desarrollado en el código ASCE / SEI 41-06 CM, supone una mejora respecto del método DCM propuesto en el código FEMA-356, a través de modificaciones en sus coeficientes.
- Acceleration-Displacement Response Spectrum (ADRS): se intersecta el espectro de capacidad en el punto de desempeño con la respuesta de aceleración-desplazamiento.
- Modified Acceleration-Displacement Response Spectrum (MADRS): genera una respuesta de aceleración-desplazamiento modificada (MADRS) que intersecta el espectro de capacidad en el punto de desempeño.

La Figura 2.15 muestra un esquema del proceso seguido en los procedimientos estáticos no lineales.

Figura 2.15: Diagrama de flujo que representa el proceso seguido en procedimientos estáticos no lineales. Fuente: FEMA-440

A través de estos métodos se obtiene el desplazamiento espectral que experimentarán las edificaciones según su tipología constructiva, para un input sísmico determinado. Para este desplazamiento espectral se calculan las probabilidades de que las edificaciones sufran distintos grados de daño, mediante el uso de las curvas de fragilidad (Figura 2.16). Como se mencionó anteriormente, diversas metodologías y autores en la literatura proporcionan los parámetros de estas curvas para tipologías constructivas propias de América y Europa.

Figura 2.16. Ejemplo de curvas de fragilidad y de las probabilidades de distinto grado de daño para un tipología constructiva.

La clasificación de los grados de daños dependerá de la metodología utilizada. Las metodologías Hazus y Risk-UE establecen cinco estados de daño: : Leve, Moderado, Extenso, Completo y Edificios Sin daños.

La Tabla 2-7 muestra la correspondencia entre la clasificación de daños dada por la EMS-98 y por el método 2 de la metodología Risk-UE (coincidente con los grados de daño definidos en la metodología Hazus-MH, 2003)

Tabla 2-7. Grados de daño y correspondencia entre diferentes escalas.

GRADO DE DAÑO	EMS-98	RISK-UE (LM2)	DESCRIPCIÓN
0 (D0)	Ninguno	Ninguno	Sin daños
1 (D1)	Leve	Leve	Daño ligero o despreciable
2 (D2)	Moderado	Moderado	Daño estructural leve, no estructural moderado.
3 (D3)	Fuerte	Extenso	Daño estructural moderado, no estructural fuerte.
4 (D4)	Muy fuerte	Completo	Daño estructural fuerte, no estructural muy fuerte.
5 (D5)	Colapso		Daño estructural muy fuerte, colapso total o cerca del colapso.

Una vez determinadas las probabilidades de que las edificaciones sufran diferentes grados de daño, se pueden estimar otros parámetros indicadores del riesgo sísmico urbano como las pérdidas económicas asociadas al daño en las edificaciones y las pérdidas humanas ocasionadas por el colapso en los edificios. El alcance de los parámetros a estimar dependerá del grado de detalle de la información de elementos estructurales y no estructurales, costes y ocupación, entre otros, con que se cuente. Las metodologías HAZUS, Risk-UE, así como trabajos publicados por Coburn and Spence (2002) y Vacareanu et al. (2004) presentan relaciones empíricas para calcular estos parámetros, basados en observaciones y estadísticas de terremotos ocurridos. Barbat et al. (2015) presentan una metodología para la cuantificación de pérdidas económicas estimadas de manera probabilista.

CAPÍTULO 3

MODELIZACIONES Y TÉCNICAS

PROPUESTAS PARA LA

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

EN ESPAÑA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha puesto de manifiesto la variedad de métodos existentes para la estimación de las cuatro fases principales que componen la evaluación del riesgo sísmico: el cálculo de la **peligrosidad**, la cuantificación del **efecto local**, la **vulnerabilidad** de los elementos expuestos y la estimación del **daño**. Cada una de estas fases representa un campo de conocimientos de diferentes disciplinas que involucra el criterio de expertos en las áreas de la geología, geofísica, sismología, geotecnia e ingeniería estructural, principalmente, así como el manejo de sistemas de información geográfica para el análisis espacial de los datos de partida y representación cartográfica de los resultados.

El presente capítulo presenta una propuesta metodológica que sirva como guía para un estudio completo de riesgo sísmico a escala urbana. La propuesta incluye modelos de sismicidad, fuentes y atenuación específicos para España, por lo que la metodología integral que se presenta es enfocada a ciudades o poblaciones españolas, si bien sería extrapolable a otros países considerando modelos adaptados a su problemática.

En la propuesta se detallarán cada una de las fases, información requerida y procedimientos para la necesaria caracterización de los inputs de cálculo del riesgo, y se establecerá la convolución entre todos ellos para obtener los resultados con el grado de detalle que requiere un estudio del riesgo sísmico a escala urbana.

Al mismo tiempo, en cada una de estas fases se proponen los métodos considerados óptimos o más idóneos para abordar de la manera más realista posible las diferentes incertidumbres que conllevan las modelizaciones dentro del estudio de riesgo inherente a un fenómeno natural que hoy en día, es difícil de predecir.

El capítulo parte del análisis de las características sismotectónicas con el que debe partir el estudio de la peligrosidad sísmica. En él se expondrá el marco geodinámico y las fuentes sísmicas existentes en España con la intención de que sirvan de referencia para estudios de peligrosidad y riesgo sísmico que se desarrollen dentro de esta región.

Posteriormente, se detallarán los pasos para el estudio de la sismicidad del área que se considera que puede tener influencia en el emplazamiento estudiado, y se propondrán dos métodos para la

modelización de las fuentes sísmicas: el Método Clásico Zonificado y el Método Híbrido de Zonas y Fallas, propuesto por Rivas (2014), el cual que combina zonas sismogénicas con fallas modelizadas como fuentes independientes, con el fin de que ambos métodos se combinen en el posterior cálculo de la peligrosidad.

Una vez definidos los parámetros sísmicos de las fuentes se describe el proceso de selección de los modelos de movimiento fuerte, donde se exponen los modelos más utilizados actualmente, y posteriormente, se explica como todos estos inputs se combinan en el estudio probabilista de la peligrosidad.

En el siguiente apartado, se exponen las técnicas realizadas para obtener los modelos de la estructura del suelo que definirán la cuantificación del efecto local, a través de la velocidad de la onda de cizalla s , y las metodologías para establecer la clasificación de suelos en base a estas velocidades. Se describe como estimar la peligrosidad sísmica en la superficie del terreno, a partir de esta clasificación.

Seguidamente, se introduce un apartado dedicado a la creación de una base de datos que contenga la información necesaria de los elementos expuestos al riesgo y como estimar y asignar la vulnerabilidad a los edificios que conformen el parque inmobiliario del entorno urbano estudiado. En este apartado se incluirán recomendaciones y una propuesta para cuantificar las incertidumbres que conlleva el proceso de asignación de tipologías constructivas a las edificaciones.

Finalmente, se presenta un apartado dedicado a la fase de estimación del riesgo sísmico, donde se comenzará por describir la metodología para la estimación del daño en los edificios. Se proponen dos métodos analíticos de los publicados por FEMA-440 para caracterizar la respuesta de las estructuras ante el movimiento sísmico esperado. Posteriormente, se proponen las metodologías más convenientes para estimar, a partir del grado de daño observado en los edificios, los demás indicadores del riesgo sísmico a escala urbana, referidos a las pérdidas humanas y económicas esperadas para los escenarios sísmicos definidos.

La Figura 3.1 muestra un esquema con las diferentes fases y etapas del estudio de riesgo sísmico a escala urbana presentado en esta propuesta.

Figura 3.1. Esquema de las diversas fases que componen el estudio completo de riesgo sísmico a escala urbana.

3.2 ANÁLISIS SISMOTECTÓNICO

El primer paso a desarrollar dentro de un estudio de riesgo sísmico es la identificación de las unidades tectónicas y estructuras geológicas presentes en la zona de estudio, para definir las fuentes sísmicas existentes y que tendrán influencia en la peligrosidad. Esto conlleva un primer análisis, a escala regional, para conocer el régimen tectónico de la zona de influencia, que suele identificarse con un radio de 300 km alrededor de la población de estudio. Un segundo análisis se plantea a escala local para conocer la posible existencia de fallas activas próximas a la población o zona de estudio, que pueden identificarse con las fuentes de los sismos que mas contribuyan a la peligrosidad, si bien en algunos casos se pueden encontrar contribuciones de sismos lejanos

Las características geodinámicas conocidas de las fuentes sísmicas permiten establecer la metodología a utilizar para la modelización de las mismas, que como se vió en el capítulo anterior podían ser de tipo zona, tipo falla o bien modelos híbridos. Lo ideal sería conocer las tasas de deformación, geometría, magnitud máxima esperable y otras características cinemáticas de las fallas, para poder aplicar aplicar una metodología que incluya las fallas como fuentes individuales en el cálculo de la peligrosidad probabilista. Estas características son determinadas a través del estudio de terremotos preservados en el registro geológico, rama conocida como *paleosismología* (Martinez, J.J. et. al., 2003), o a través de la medición de deformaciones corticales en las fallas mediante el uso de técnicas geodésicas (interferometría radar de satélite y observaciones GPS en estaciones de registro continuo). (González, F. et. al., 2012). Sin embargo, es difícil disponer de información de los parámetros necesarios para modelizar las fallas como unidades independientes.

Hoy en día, diversas instituciones e iniciativas comparten información o crean plataformas para la visualización y descarga de datos tectónicos correspondientes a fallas activas y fuentes sísmicas a nivel local o global. Iniciativas como la del proyecto GEM (del inglés, *Global Earthquake model*) (Woessner et. al, 2015), iniciada en el 2009 con el objetivo de recopilar información mundial sobre fallas activas y fuentes sísmicas, permiten obtener información valiosa para establecer el marco sismotectónico en el que se basarán las metodologías y modelos que se seleccionen para un estudio de peligrosidad o riesgo sísmico. La mayoría de las bases de datos de fallas activas cuaternarias y zonas sismogénicas a nivel mundial han sido desarrolladas por el USGS (del inglés, *United States Geological Survey*), que presenta información neotectónica de países americanos, y zonas de subducción del mundo. Por otra parte, en el contexto europeo, destaca la iniciativa SHARE (del ingles, *Seismic Hazard Harmonization in Europe*),

la cual ha compilado información de bases de datos de distintos países europeos, creando la Base de datos de fuentes sismogénicas europeas (EDS).

A continuación se expone el marco de referencia geológico y neotectónico para estudios de peligrosidad sísmica dentro de España.

3.2.1 Marco geodinámico de la Península Ibérica

La Península Ibérica se enmarca en una zona de convergencia lenta entre las Placas Litosféricas de Eurasia, África y la microplaca Ibérica (Nocquet et al., 2012). La Figura 3.2 muestra el marco tectónico de la Península, con las principales fallas y cuencas.

Las publicaciones científicas más recientes que tratan los campos de esfuerzos y deformaciones actuales del oeste de la placa Euroasiática a partir de los últimos datos de velocidades GPS, indican que la corteza de la Península Ibérica al norte de la Cordillera Bética forma parte de Eurasia estable, al presentar una velocidad media residual de 0.3 ± 0.1 mm/a con respecto a la Europa estable (Nocquet et al., 2012). En el sur de España, las Béticas centrales y occidentales muestran un movimiento sistemático de unos 4 mm/a hacia el O-SO en relación con Iberia, movimiento que es solidario con la zona del Rif Marroquí, aunque de velocidad algo menor que en éste. Los datos al este de la Península indican que la velocidad de convergencia Iberia-Africa en la transversal del SE de Iberia sería de unos 4 mm/a. La mayor parte de esta convergencia se absorbe en las estructuras situadas en el norte de Argelia, el mar Mediterráneo y la zona de cizalla de las Béticas Orientales. La dirección de este movimiento es NO-SE (DeVicente et al., 2011, Martínez-Díaz. et al., 2012).

Figura 3.2. Marco tectónico de la Península Ibérica. Se muestran las principales fallas y cuencas. Las flechas rojas indican la dirección de emplazamiento de la cuenca de Alborán. Los colores representan: 1) Corteza Oceánica; 2) Bloques levantados en corteza continental; 3) Plataforma continental. 4) Cuencas en la plataforma. 5) Pirineos (vergenza N) 6) Pirineos (vergenza S). 7) Bloques levantados en corteza continental. 8) Cuencas en corteza continental. 9) Dominio de Alborán. 10) Abanico del Golfo de Cádiz. 11) Corteza Continental Euroasiática. 12) Corteza Continental Africana. (DeVicente et al., 2011).

3.2.2 Fallas activas

En los últimos años, la comunidad científica en la rama de geología ha llevado a cabo diferentes iniciativas con el objetivo de incrementar el conocimiento de las fallas activas en la Península Ibérica, uniendo esfuerzos ante el desafío de identificar y caracterizar las estructuras geológicas potenciales capaces de generar terremotos destructivos. Desde la creación del Mapa Neotectónico de España (IGME-ENRESA, 1998), se han llevado a cabo en la Península proyectos como IBERFAULT (CGL2009-07388), SHARE (Instituto Superior Técnico, IST-Portugal), FASE-GEO (CGL2009-09726, IP: J. García-Mayordomo), INTERGEO (CGL2013-47412-C2-IP: J.J. Martínez Díaz), entre otros, para recopilar y unificar la información de las fallas activas y paleosismología de la Península. Una de las iniciativas más actualizadas y confiables es la creación de la base de datos de fallas activas cuaternarias para la Península Ibérica QAFI (García-Mayordomo et al. 2012), promovida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (IGME, 2012), con el fin principal de proporcionar al público información actualizada

sobre fallas activas con actividad neotectónica en España en los últimos 2,59 Ma (Cuaternario) y servir como plataforma para estudios de riesgo sísmico.

La primera versión de la base de datos QAFI se construyó en el año 2011 a partir de información proporcionada por más de 40 investigadores en Ciencias de la Tierra, y desde entonces, dos nuevas versiones (QAFI v.2 (2012) y QAFI v.3 (2015) (Figura 3.3)) han sido publicadas y divulgadas on-line. La versión más reciente, QAFI v.3, cuenta hoy en día con 299 registros, de los cuales 40 registros forman parte de una nueva base de datos denominada Fallas en Debate (Debated Faults), ya que son fallas que no tienen evidencias concluyentes sobre su actividad Cuaternaria, o la información no ha sido aún publicada, pero es muy posible que sí sean fallas activas.

Figura 3.3. Mapa de fallas del QAFI v.3 en la Península Ibérica

La unidad básica de registro en la base de datos es una única falla, o los segmentos en que ésta se pueda dividir, según el criterio de expertos que determina que la falla tiende a romper el mismo tramo en cada evento, lo cual representa fuentes sísmicas independientes. El analista de peligrosidad debe elegir si utiliza el criterio de segmentación propuesto o toma en cuenta uno nuevo a la hora de modelizar las fallas como fuentes sismogénicas. En esta tesis se utilizará el criterio de segmentación propuesto en QAFI para la caracterización de las fuentes tipo *falla*.

La información sobre cada falla, o segmento de falla, referente a su geometría y actividad sísmica, está organizada en la base de datos de la siguiente manera:

- **Identificación-Compilación:** Nombre de la falla y/o segmento, método de identificación, encuadre geológico y geográfico, localización (latitud y longitud de coordenadas de la traza de la falla) y datos de los compiladores.
- **Geometría y cinemática:** Parámetros geométricos (dirección, buzamiento, longitud, profundidad mínima y máxima, ancho, área) y cinemáticos (sentido de movimiento de la falla).
- **Actividad Cuaternaria:** Evidencia, Edad de los depósitos más modernos afectados por la falla, Tasa de deslizamiento, Máximo deslizamiento por evento, número de eventos sísmicos, etc.
- **Potencial sísmico:** Máxima magnitud, intervalo de recurrencia y fecha del último evento máximo.
- **Sismicidad asociada:** Nombre del evento, fecha, localización, intensidad y/o Magnitud, fuente de información y referencias.
- **Información extendida y Referencias:** Enlace a un fichero *.zip conteniendo documentación relacionada con la falla (artículos, pósters de congreso, etc.) y listado de referencias.

Estos datos se pueden consultar tanto de manera on-line, como en los documentos correspondientes a su publicación.

3.2.3 Zonas sismogénicas

Una vez identificadas las fallas como fuentes generadoras de sismos, los estudios de peligrosidad sísmica requieren definir un modelo que refleje el comportamiento y la geometría de las fuentes sísmicas, debido a que, generalmente, las fallas existentes no se conocen con el nivel de detalle requerido para definir modelos particulares que representen la sismicidad asociada, lo que impide la inclusión de las mismas como fuentes independientes en el cálculo de la peligrosidad. Como se mencionó en el *Apartado 2.2.1.3.1 del Capítulo de Estado del arte*, el método más ampliamente utilizado para la modelización de las fuentes sísmicas consiste en identificar zonas sismogénicas para contemplar aquella sismicidad que no está claramente asociada a las fallas identificadas. Las zonas sismogénicas son áreas dentro de las cuales se asume que existe un potencial sísmico uniforme espacial y temporalmente, esto es, la probabilidad de ocurrencia de un evento de cierta magnitud es la misma en cualquier punto de la zona y en cualquier instante. La utilización de un modelo

independiente del tiempo y uniforme en el espacio trata de representar el conocimiento actual sobre la sismicidad futura y sus características en esa área.

La subdivisión de un territorio en zonas sismogénicas de características sismotectónicas comunes se denomina zonificación. La delimitación de zonas sísmicas requiere englobar en una misma zona aquellas fallas o estructuras geológicas que puedan generar patrones similares de sismicidad. Dicho de otra forma, los límites deben separar zonas capaces de generar terremotos cuya magnitud máxima y recurrencia sean bien diferentes.

La diferencia entre los criterios utilizados para la definición de las zonas sismogénicas causa una notable variación en la combinación de factores dentro del procedimiento para la definición de la zonas sismogénicas de un territorio, lo que ha generado la existencia de distintas zonificaciones para modelizar las fuentes en un mismo territorio, propuestas por diversos autores. Estos criterios se basan principalmente en la distribución de la sismicidad y la localización de los dominios o estructuras geológicas. (García-Mayordomo et.al. 2015).

A continuación se describen las zonificaciones más utilizadas en los estudios de peligrosidad de la Península Ibérica, siendo las de García-Mayordomo et al. (2010) y (2012b), desarrolladas a partir de la reunión científica IBERFAULT 2010, las propuestas como más idóneas, por involucrar la participación y opinión consensuada de diferentes expertos en las áreas de tectónica activa, paleosismicidad y sismotectónica. Además, consideran criterios sísmicos, geológicos, tectónicos y reológicos a la hora de la definición y caracterización de las zonas, dando distintos pesos a cada tipo de datos.

Desde la década de los 80, se han desarrollado zonificaciones para España y zonas adyacentes, siendo una de las primeras la publicada por Martín (1983) (Figura 3.4.a), a partir de datos geológicos y sismológicos, validado mediante un análisis de homogeneidad sísmica. Posteriormente, se desarrollaron zonificaciones como la IPEEE (1993) (Figura 3.4.b) dentro del contexto del estudio de peligrosidad para plantas nucleares españolas y la de Molina (1998) (Figura 3.4.c) basada en un modelo de grandes zonas y uno detallado a escala local, diferenciando zonas de sismicidad superficial y de sismicidad más profunda. En el año 2002, se definió una zonificación para realización del Mapa de peligrosidad sísmica de la Norma de Construcción Sismorresistente de España NCSE-02 (Figura 3.4.d).

Otra zonificación destacable fue la desarrollada en el proyecto GSHAP (Giardini et al., 2003) con el fin de combinar zonas oficiales de diferentes países para obtener un mapa de peligrosidad mundial. Este proyecto fue posteriormente actualizado por el proyecto SESAME.

La sismicidad del norte de África puede tener influencia en el movimiento esperado en el Sudeste de la Península, por lo que cabe mencionar las zonificaciones propuestas por Aoudia et al. (2000) y Hamdache (1998), desarrolladas para la región del Atlas y norte de Argelia.

Entre las zonificaciones desarrolladas en los últimos años se encuentra la desarrollada por Bernal y asociados, basado en los trabajos de peligrosidad realizados por sus autores en la década de los 90 y la primera década del siglo XXI, modificada en IGN-UPM, 2013.

Figura 3.4. Zonificaciones sísmicas propuestas por diferentes autores para la Península Ibérica. a) Martín (1983) b) IPEEE (1993), c) Molina (1998) Y d) NCSE-02 (2002).

La zonificación más utilizada, actualmente, en estudios de peligrosidad es la de García Mayordomo et al. (2012) (GM2012). Esta zonificación se ha diseñado de forma secuencial y está basada en un proceso de Juicio de Expertos fundamentado en la metodología SHAC (1997). La primera versión es la denominada IBERFAULT (García-Mayordomo et al. 2010), basada en la metodología de zonificación propuesta por García-Mayordomo y Giner (2006), en la que se analizan seis temáticas diferentes: cartografía geológica y tectónica, morfología del relieve, espesor de corteza, flujo térmico y sismicidad histórica e instrumental, para definir las zonas sismotectónicas o bien para poder ajustar zonificaciones ya propuestas o publicadas. Existió una zonificación intermedia denominada SHARE consensuada con el Proyecto Europeo SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe), en la que se introdujeron ligeras modificaciones de forma, fundamentalmente en las zonas transfronterizas.

La zonificación de García-Mayordomo et al. se considera el resultado de un trabajo bien desarrollado y documentado, que hace uso de información geofísica relevante. El trabajo se realizó a través de un proceso inicial de interacción basado en juicio de expertos españoles, sometido después a consenso con otros expertos de Francia y Portugal para las zonas fronterizas y finalmente, objeto de revisiones

y ajustes posteriores como consecuencia de las discusiones mantenidas en las reuniones de la Comisión de Seguimiento de los trabajos para la realización del Nuevo Mapa de Peligrosidad Sísmica de España y la incorporación de los últimos datos científicos existentes.

A pesar de que la versión más reciente y utilizada de la zonificación de García-Mayordomo es la publicada en el año 2012 (GM12), la zonificación de GM10 sigue siendo útil en el caso de estudios de peligrosidad donde se implementen las fallas como fuentes independientes en el cálculo, por ser una zonificación especialmente diseñada para su uso con modelos híbridos de zonas y fallas. Por ello finalmente se proponen ambas para un estudio de peligrosidad probabilista en el ámbito nacional, dependiendo del método de modelización de fuentes seleccionado.

La Figura 3.5 muestra las zonificaciones publicadas por García-Mayordomo (2010) y García-Mayordomo (2012).

Figura 3.5. Zonificación de García-Mayordomo (2010) (a la izq.) y (2012) (a la der.)

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS

3.3.1 Catálogo sísmico

La confección de un catálogo que incluya todos los terremotos que potencialmente puedan afectar a la región de estudio, constituye el siguiente paso a desarrollar para la estimación de la peligrosidad sísmica con carácter probabilista-determinista y la consecuente estimación del riesgo. La elaboración del catálogo sísmico conlleva la recopilación de todos los eventos ocurridos desde tiempos históricos hasta la época instrumental actual, con su correspondiente información de localización, fecha de ocurrencia y tamaño de los eventos. Este catálogo ayuda a conocer el potencial sísmico de la región, puesto que proporciona información sobre la frecuencia y magnitud de los eventos registrados, permitiendo así caracterizar el comportamiento de las fuentes sísmicas y definir un patrón de sismicidad que permita definir uno de los inputs de cálculo de la peligrosidad sísmica.

El primer paso dentro de esta fase consiste en delimitar la zona cuya sismicidad y tectónica puede tener influencia en la peligrosidad del emplazamiento de estudio. Este área es denominada *zona de influencia* y establece el marco de referencia para el resto del estudio, permitiendo determinar el grado de detalle con el que se deben abordar las siguientes fases. Casi todas las normativas establecen como área de influencia un círculo de radio de 300 km alrededor del punto a estudiar e imponen el análisis de la sismicidad en la región comprendida dentro del mismo.

Este área suele ser suficiente, aunque a veces se presentan excepciones, como es el caso del Sudoeste de la Península Ibérica, cuyo estudio requiere una ampliación de la zona hasta englobar la estructura tectónica de Azores-Gibraltar. Los terremotos originados en ésta, han hecho sentir sus efectos en casi toda la Península debido a su baja atenuación y han sido determinantes en la peligrosidad del Sudoeste a distancias superiores, en ocasiones, a los 400 km del epicentro. De ahí la necesidad de ampliar el radio de la zona en los correspondientes estudios. (Benito y Jiménez, 1999).

Una vez definida la zona de influencia, junto con las fuentes sísmicas contenidas en ella, y recopilada la información procedente de estudios sobre terremotos históricos y eventos registrados instrumentalmente por las diferentes agencias, se procede a elaborar el catálogo de proyecto que se utilice en los cálculos de peligrosidad.

Este catálogo debe ser homogéneo en cuanto a la medida del tamaño de los terremotos y debe estar depurado de réplicas y premonitores que son dependientes de un sismo principal. Esto último se debe

a que la sismicidad considerada en las metodologías utilizadas sigue un modelo Poissoniano que supone que cada evento es independiente espacial y temporalmente de los demás, por lo que la consideración de réplicas incrementaría erróneamente la sismicidad de la zona a efectos de cálculo de la peligrosidad.

Finalmente, el catálogo sísmico debe ser completo para cada rango de magnitud de los eventos, lo que requerirá determinadas correcciones para suplir la ausencia de registros, especialmente de los grados más bajos de magnitud, al remontarnos en el tiempo.

3.3.1.1 Homogeneización del catálogo

Un catálogo sísmico es homogéneo, en lo referente al tamaño de sismos, cuando el parámetro que lo define es el mismo para todos los terremotos. Frecuentemente, en un mismo catálogo se incluyen medidas de magnitud en diferentes escalas, o incluso dentro de una misma escala, obtenidas a partir de diferentes fórmulas.

En el caso de España, la larga escala temporal del catálogo sísmico y los diferentes tipos de instrumentación utilizados, hacen que el catálogo esté compuesto por diversos parámetros de tamaño. Es imprescindible realizar las conversiones pertinentes entre las diferentes estimaciones de magnitud, a fin de obtener un catálogo sísmico homogéneo. Se recomienda utilizar la escala sismológica de magnitud de momento M_w (Hanks y Kanamori, 1979) como parámetro de tamaño, siguiendo la tendencia habitual en estudios de peligrosidad sísmica. La magnitud M_w se relaciona directamente con la cantidad de energía liberada por el terremoto (llamada Momento sísmico, M_0). Entre las principales ventajas de la escala de magnitud M_w se encuentra que no se satura para grandes movimientos, además de ser el parámetro utilizado en la mayoría de modelos de movimientos fuertes desarrollados actualmente.

Para homogeneizar las magnitudes a M_w , se hace necesario deducir o aplicar una regresión lineal, con el fin de obtener la expresión que relaciona las magnitudes del catálogo original con magnitudes momento M_w . En el caso de existir incertidumbres asociadas a los parámetros originales, éstas incertidumbres se pueden asociar a las magnitudes momento a través de una ecuación de propagación de errores, asociada tanto a la incertidumbre del parámetro original, como a las incertidumbres obtenidas de los parámetros de las correlaciones.

Para el caso de España, se proponen las correlaciones definidas en el proyecto para el nuevo *Mapa de peligrosidad sísmica de España (MPSE)* (IGN-UPM, 2012), que servirá de base para la revisión de la norma sismorresistente NCSE02, obtenidas a través de regresiones RMA, Isobe et al. (1990).

La Tabla 3-1 muestra las correlaciones entre los distintos parámetros de tamaño y la Mw. Estas correlaciones, junto con el número de terremotos utilizado para su formulación se presentan gráficamente en la Figura 3.7 y Figura 3.7.

Tabla 3-1. Correlaciones utilizadas entre distintos parámetros de tamaño y Mw en el MPSE (IGN-UPM, 2012).

$y=a+bx$	σ_a	σ_b	σ_{ab}	Rango de aplicación
$M_w = 1.656 + 0.545 I_{max}$	0.144	0.030	-0.00011	III- (IX-X)
$M_w=0.290 + 0.973 m_{bLg}(MMS)$	0.208	0.049	-0.00045	3.1-7.3
$M_w=-1.528 + 1.213 m_b (vc)$	0.385	0.077	-0.00013	3.7-6.3
$M_w=0.676 + 0.836 m_{bLg}(L)$	0.202	0.052	-0.00013	3.0-5.1

Figura 3.6. Correlaciones entre escalas de tamaño obtenidas en el proyecto para la realización del Nuevo Mapa de Peligrosidad sísmica de España e histogramas de las diferencias ($M_w - m_{bx}$) para cada una de las magnitudes. Fuente: Proyecto OPPEL (IGN-UPM, 2012).

Figura 3.7. Correlaciones entre escalas de tamaño obtenidas en el proyecto para la realización del Nuevo Mapa de Peligrosidad sísmica de España e histogramas de las diferencias ($M_w - m_bx$) para cada una de las magnitudes. Fuente: Proyecto OPPEL (IGN-UPM, 2012).

3.3.1.2 Depuración

Dentro de un estudio de peligrosidad sísmica con enfoque probabilista, se asume la hipótesis de que la sismicidad se ajusta a un modelo de *Poisson*, lo que supone considerar que los sismos son independientes espacial y temporalmente, siguiendo una distribución aleatoria dentro de un periodo de tiempo dado. En otras palabras, la ocurrencia de cualquier terremoto es independiente de la ocurrencia de todos los demás, dentro de una misma fuente sísmica.

Bajo esta premisa, es necesario identificar y eliminar del catálogo los terremotos que sean premonitores o réplicas de otro principal. Dicha eliminación se debe a que éstos contradicen la hipótesis antes mencionada de que no existe una vinculación causa-efecto entre sismos, al estar directamente asociados al sismo principal de su serie. Este proceso se conoce como *depuración* del catálogo y precisa, en primera instancia, identificar series sísmicas o agrupaciones de terremotos relacionados en el espacio y en el tiempo, para posteriormente sustraer de las mismas todos los

eventos, excepto los de mayor magnitud, los cuales se consideran principales de la correspondiente serie.

No existe un criterio estadístico definitivo para delimitar la extensión de los terremotos no principales de una serie sísmica. Entre las propuestas más utilizadas para realizar la depuración, se pueden mencionar las de Reasenberg (1985) y Gardner y Knopoff (1974), siendo esta última tradicionalmente la más utilizada para este proceso, debido a su sencillez y solidez.

El método de Gardner y Knopoff (1974) fija límites a través de ventanas espaciales y temporales, en función de la magnitud del terremoto principal de una serie sísmica. De este modo, todos los terremotos de magnitud menor o igual a la del evento principal, en un rango temporal y espacial preestablecido, son considerados como eventos dependientes del mismo y por lo tanto, eliminados como réplicas o premonitores de éste. Con la ventana espacial se analiza hasta qué distancia se producen réplicas y premonitores y la ventana temporal define el intervalo de días en que pueden producirse estos eventos.

Las ventanas espacio-temporales se establecen por medio de dos funciones logarítmicas independientes entre ellas, que relacionan el tiempo y el espacio con la magnitud del terremoto principal y cuya forma está dada por las siguientes funciones:

$$\log(L) = a_1 \times M + b_1 \quad [3-1]$$

$$\log(T) = a_2 \times M + b_2 \quad [3-2]$$

donde L representa la distancia en km, T es el tiempo (días), M es la magnitud del terremoto principal (M_w), a_1 , b_1 , a_2 y b_2 son constantes numéricas que se determina por análisis de regresión a partir de series conocidas.

Estas ventanas espacio-temporales han sido ajustadas a M_w en Peláez (2007) y aplicadas a la Península Ibérica en los trabajos de Crespo (2011), donde se consideraron apropiadas para España, y en el proyecto para la realización del *Nuevo Mapa de Peligrosidad sísmica de España* (IGN-UPM, 2012) (Figura 3.7), donde además se diseñó un procedimiento basado en el método de Montecarlo para considerar las incertidumbres asociadas a la definición del parámetro de tamaño de los sismos y la homogeneización de las mismas a M_w . En dicho trabajo, se asume que cada evento tiene asociada una incertidumbre correspondiente a una distribución triangular cuya media y dispersión son obtenidos de las correlaciones de homogeneización del catálogo. Se aplica un método estocástico de Montecarlo generando un alto número de catálogos sintéticos donde la magnitud de cada evento es un valor

aleatorio contenido dentro de la distribución de magnitudes dada. Posteriormente, se aplica un algoritmo para identificar los eventos como principales o réplicas y se calcula la frecuencia en la que cada sismo es catalogado como réplica. Finalmente, se establece un umbral de frecuencia de las ejecuciones por encima del cual se considera definitivamente que el evento es una réplica o premonitor, en este caso, determinado en 95%.

Figura 3.6. Ventanas espacio-temporales aplicadas en el proyecto para la realización del Nuevo Mapa de Peligrosidad sísmica de España. Fuente: Proyecto OPPEL (IGN-UPM, 2012).

Las expresiones de las ventanas propuestas para el caso de España (utilizadas para el MPSE) son:

$$\log(L) = 0.2 \times M + 0.4 \quad \text{para la ventana espacial}$$

$$\log(T) = 0.6 \times M - 0.7 \text{ y } \log(T) = 0.04 \times M + 2.6 \quad \text{para la ventana temporal}$$

3.3.1.3 Análisis de completitud

La última fase en la confección del catálogo de proyecto consiste en el análisis de completitud. Un catálogo sísmico se considera completo si contiene todos los sismos que han ocurrido en el área de influencia considerada. El problema frecuentemente encontrado en cuanto a este aspecto es que al remontarnos hacia atrás en el tiempo, la información relativa a terremotos pequeños o terremotos no sentidos, se pierde o disminuye. En general, cuanto menor sea la intensidad o magnitud, menor será el periodo en el que el catálogo pueda considerarse completo, puesto que en tiempos remotos no se contaba con la instrumentación necesaria para detectar los sismos más pequeños.

El análisis de completitud consiste en identificar los periodos de tiempo para los cuales se puede considerar que el catálogo es completo para los diferentes intervalos de magnitud considerados. Concretamente, se deben identificar una serie de años de referencia que marcan el inicio del periodo de completitud, para cada zona y para cada rango de magnitudes.

Para resolver el problema de falta de completitud, uno de los métodos más extendidos es el introducido por Stepp (1971), que consiste en establecer un año de referencia para cada grado de intensidad y/o magnitud, a partir del cual puede considerarse que el catálogo es completo (para dicho intervalo de intensidad o magnitud). Una vez determinados los años de referencia, se determinan las tasas de ocurrencia de sismos para cada intervalo de magnitud o intensidad, a partir de dichos años. Estas tasas se consideran constantes, y se pueden usar para estimar (mediante extrapolación) el número hipotético de terremotos ocurridos durante todo el periodo de estudio, aunque estos no hayan sido documentados.

Otros métodos empleados para el análisis de completitud son el método gráfico (menos robusto que el de Stepp (1971), el método propuesto por Bungum y Husebye (1974) y el publicado por Tinti y Mulargia (1985).

El análisis de completitud propuesto se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se determinan los años de referencia para cada rango de magnitud siguiendo el método de Stepp (1972) y considerando intervalos de 0,5 unidades de magnitud.
- Se señala el año de referencia a partir del cual el número acumulado de terremotos por año se puede considerar constante. Este año corresponde al punto a partir del cual la curva representada tiene pendiente constante.
- Se identifican los años de referencia para cada intervalo de magnitud y cada zona estudiada, que marcan el inicio del periodo para el que se puede aceptar que el catálogo es completo en el rango de magnitudes considerado. (Figura 3.8)

Figura 3.8. Ejemplo de análisis de completitud

3.3.2 Modelización de la fuente sísmica

Como se ha mencionado anteriormente, la modelización de la fuente sísmica constituye un factor determinante en el cálculo de la peligrosidad sísmica. La sismicidad de cada fuente sísmica se caracteriza por medio de parámetros derivados de la distribución espacio-temporal de la sismicidad, así como de la magnitud máxima esperada dentro de cada fuente. El método más utilizado para representar las fuentes sísmicas ha sido el basado en zonas sismogénicas, que se presenta como alternativa a la falta de información detallada o al desconocimiento de fallas activas existentes en la región de estudio. Sin embargo, en regiones donde se tiene información detallada y control de la existencia de las fallas potenciales, este método puede subestimar el potencial sísmico de las fallas, así como ser muy conservador en las áreas alejadas a ellas, al repartir el potencial de las mismas en un área mayor. Debido a efectos propios de la fuente sísmica, las aceleraciones se disparan en el plano de ruptura, atenuándose rápidamente con la distancia, lo que hace que la peligrosidad real se incremente notablemente en el entorno de la falla. Tal como se ha observado en terremotos recientes, como en el caso preciso del terremoto de Lorca del 2011, las aceleraciones llegan hasta a duplicarse o triplicarse en dicho entorno (Rivas-Medina, 2014). Este hecho no se refleja en los cálculos de peligrosidad por el método clásico zonificado, pero sí cuando se incluyen las fallas como unidades independientes, caracterizadas sobre la base de datos geológicos, para lo cual se requiere conocer su geometría y tasas de deslizamiento (*slip rate*).

A pesar de que en los últimos años se ha incrementado el interés por introducir las fallas como fuentes independientes en el cálculo de la peligrosidad, las metodologías existentes suelen combinar las mismas con zonas sismogénicas, debido a al desconocimiento de los parámetros cinemáticos de fallas activas en la región. Uno de los problemas planteados en este tipo de metodologías ha sido cómo evitar duplicar información en cuanto al potencial sísmico de las fallas. El problema se da, principalmente, cuando las fallas estudiadas son fallas lentas, puesto que presentan periodos de recurrencia muy largos, lo que ocasiona que el catálogo sísmico no cubra estos periodos por completo, por lo que resulta complejo distinguir la sismicidad asociada a la falla de la asociada a las zonas para poder establecer modelos de recurrencia diferenciados (Rivas-Medina, 2014).

Entre los pocos trabajos existentes en la literatura con métodos híbridos de zonas y fallas destacan los propuestos por Frankel et al. (1996) y Bungum (2007). El primero plantea el reparto del potencial sísmico entre las zonas y las fallas a través de una magnitud de corte establecida, determinando que en la zona no se puede producir una magnitud mayor a la magnitud de corte, lo que condiciona la metodología a sitios donde se conozca de manera muy precisa la tectónica local. Bungum (2007) propone un reparto del potencial sísmico entre zonas y fallas a priori, lo que de igual manera

presupone que el registro sísmico y geológico se conoce totalmente, suponiendo una limitación importante en zonas de fallas lentas donde no se puede presuponer que se ha registrado todo el potencial sísmico de las fallas. Para solventar este problema, Rivas-Medina (2014) propone en su tesis doctoral un procedimiento basado en estas metodologías, estableciendo una división del potencial sísmico para las regiones con presencia de fallas lentas donde no se puedan obtener datos debido a sus largos periodos de recurrencia.

La propuesta desarrollada en esta tesis plantea la aplicación del método clásico zonificado (MCZ) y del modelo híbrido de zonas y fallas (MH) de Rivas-Medina (2014) para su comparación e introducción en un árbol lógico. El primer método se propone por su robustez y contrastada aplicación en el ámbito de la peligrosidad sísmica, y el segundo, por representar la metodología más reciente para la inclusión de fallas activas como fuentes independientes en la estimación de la peligrosidad sísmica probabilista en un emplazamiento.

Para incluir ambos tipos de fuente en el cálculo de peligrosidad, debe caracterizarse su patrón de sismicidad o ley de recurrencia, junto con la magnitud máxima que cada fuente pueda generar, sea de tipo zona o tipo falla. A continuación se describe el proceso seguido en cada caso.

3.3.2.1 Método clásico zonificado (MCZ)

La metodología clásica zonificada (MCZ), conocida también como el método zonificado de Cornell-McGuire (Cornel, 1968; McGuire, 1976), emplea modelos de zonas sismogénicas en representación de las fuentes sísmicas y es el método más usado en la práctica (García-Mayordomo, 2015). A pesar de ser un método desarrollado hace más de cuatro décadas, sigue vigente en la actualidad por su facilidad de aplicación. La asunción de un modelo zonificado supone que los terremotos tienen lugar dentro de zonas sismogénicas definidas, cuyo potencial sísmico es homogéneo. Es decir, dentro de cada zona, la sismicidad se distribuye de manera aleatoria espacial y temporalmente.

Las asunciones principales de este método en cuanto a la ocurrencia de sismicidad son las siguientes:

- Los terremotos son sucesos aleatorios independientes (procesos de Poisson).
- La ocurrencia de los terremotos es equiprobable en todo el área de la zona.
- La tasa de actividad sísmica de la zona es constante en el tiempo.
- El tamaño de los terremotos está relacionado con su frecuencia por una ley de recurrencia propia de la zona y limitada a un valor máximo (magnitud máxima).

Tras la definición de las zonas y sus límites, se requiere caracterizar su sismicidad, lo que supone deducir, para cada zona definida, la ley de recurrencia de sismos en función de su magnitud, así como la magnitud máxima creíble en la zona. El modelo más utilizado para representar la recurrencia temporal de terremotos es el de Gutenberg y Richter (1944), que establece una proporción constante entre el número de sismos grandes y pequeños para una determinada zona, asumiendo que el número acumulativo de sismos que superan cada grado de magnitud varía linealmente con este parámetro (Figura 3.9).

El modelo de Gutenberg y Richter (1944) se propone con un doble truncamiento en magnitud (M_{min} , M_{max}), siendo la tasa el número de sismos de magnitud igual o superior a la mínima establecida ($\dot{N}(M_{min})$).

Para realizar el ajuste de la recta a la sismicidad los métodos más utilizados son el de mínimos cuadrados y el método de máxima verosimilitud (Aki, 1965). Una de las ventajas que se tienen al usar el método de máxima verosimilitud sobre el de mínimos cuadrados es que el cálculo es objetivo y sistemático, ya que no se incluyen datos subjetivos para elegir la parte lineal, además, se acerca mejor al valor real de β cuando el número de sismos grandes es variable (Sha y Bolt, 1982). Por otro lado, como desventajas se tiene una dependencia de la magnitud promedio de muestreo y la magnitud mínima (M_{min}). Sin embargo, este método sigue siendo la aproximación más apropiada, como se muestra en los estudios de Woessner y Wiemer (1995) y Clauset et al. (1997).

Para incorporar las incertidumbres de las magnitudes del catálogo sísmico al ajuste, se propone realizarlo a través de un método estocástico de Montecarlo, simulando un número elevado de catálogos (p.e., 1000). En cada una de estas simulaciones, cada registro del catálogo recibirá un valor de magnitud M_w aleatorio, siguiendo una función de densidad de probabilidad que se establezca para las incertidumbres obtenidas en la fase de homogeneización del catálogo, teniendo en cuenta el valor de σ de cada dato de magnitud.

Figura 3.9. Ejemplo de ajuste con el modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter, aplicando simulaciones de Montecarlo. Las líneas en tonos de grises, representan los distintos ajustes obtenidos de las simulaciones, la línea negra continua representa la media de los ajustes y las líneas discontinuas la desviación estándar ($\text{media} \pm \sigma$)

Así pues, cada zona representará una fuente sísmica independiente y los parámetros que definen la sismicidad en cada una, necesarios para el cálculo de la amenaza, son las magnitudes máxima y mínima, M_{max} y M_{min} , la tasa de ocurrencia de sismos por encima de la magnitud mínima $\dot{N}(M_{\text{min}})$ correspondiente a la media del ajuste, y la pendiente de la relación de Gutenberg-Richter, β , con su desviación $\sigma\beta$. (Figura 3.9). Estos parámetros caracterizan el patrón de sismicidad de cada zona, y configuran su ley de recurrencia.

Por otra parte, la definición de la magnitud máxima ($M_{\text{máx}}$) de cada zona es clave en todo estudio de peligrosidad. Esta se identifica con la magnitud del máximo sismo creíble y conlleva notable incertidumbre. Del catálogo sísmico se puede deducir la magnitud máxima observada en la zona, pero esta puede ser inferior a la del sismo máximo que pueda ser generado en las fallas existentes. De hecho, el catálogo sísmico suele no cubrir ciclos completos de fallas, y por tanto la magnitud del máximo sismo potencial puede ser superior a la $M_{\text{máx}}$ observada en el catálogo. Para tener en cuenta esta incertidumbre sobre la $M_{\text{máx}}$ de cada zona, se considera una distribución Gaussiana definida por los parámetros:

- Magnitud máxima mínima: magnitud máxima observada en la zona (derivada del catálogo sísmico), que corresponde al umbral inferior de la distribución. [$M_{\text{máx}}(\text{min})$].
- Magnitud máxima máxima: magnitud máxima acorde con la tectónica de la zona, que corresponde al umbral superior de la distribución. [$M_{\text{máx}}(\text{máx})$].

- Magnitud máxima media: magnitud máxima esperada, que corresponde a la $M_{\max}$ que se considera más probable. [$M_{\max} (media)$].
- Desviación estándar (σ): desviación estándar de la distribución de $M_{\max}$. [$\sigma (M_{\max})$]

Para establecer la magnitud máxima esperada en las fuentes que contienen las fallas activas estudiadas, se deben evaluar las magnitudes máximas posibles de todas las fallas a partir de su geometría y ser comparadas con las magnitudes máximas esperadas en estas zonas. Las mismas se ajustan de acuerdo a una distribución gaussiana, tomando como valores extremos los de $M_{\max} (min)$ y $M_{\max} (max)$, que se identifican a su vez con la Magnitud máxima observada en el catálogo (MMO) y con la máxima derivada por geología (MMG). El valor sigma se establece como el intervalo entre las magnitudes máxima esperada y observada con respecto a la magnitud media estimada (Figura 3.10).

En los casos donde no se cuente con información de fallas activas o las magnitudes máximas extraídas de las mismas sean inferiores a las registradas en el catálogo, se considera la magnitud máxima observada en el catálogo más la incertidumbre asociada a ella, de acuerdo a una función de distribución simétrica.

Figura 3.10. Esquema de definición de las magnitudes máximas de las zonas para el Método Zonificado.

3.3.2.2 Modelo híbrido de zonas y fallas (MH)

El modelo propuesto por Rivas-Medina (2014) se basa en un método híbrido donde las fallas activas conocidas serán modelizadas como fuentes independientes y las zonas sismogénicas representarán el conjunto de fallas pequeñas desconocidas que no pueden ser modelizadas de forma independiente por no conocer suficientemente sus características geométricas y mecánicas.

La metodología citada establece el reparto del potencial sísmico de las fuentes individuales por medio del reparto de la tasa de momento sísmico registrada en la región entre la tasa de momento sísmico acumulado en las fallas incluidas en dicha región y la que queda residual en la zona, entendiendo por zona la misma geometría que la región pero con menor sismicidad, al descontar de ella la correspondiente a las fallas. Por lo tanto, se entiende por 'región' la suma de la zona más las fallas contenidas en ella. (Figura 3.11).

Figura 3.11. Reparto de potencial sísmico de una región en diferentes fuentes.

En este modelo se incorporan una serie de condiciones para el reparto de tasas de momento sísmico, expuestas a continuación:

- La tasa sísmica anual observada en cada región, por medio del registro sísmico, se mantendrá constante, independientemente de las fuentes sísmicas consideradas.
- El reparto del potencial sísmico no se hará con todo el registro sísmico, sino con aquel que con mayor probabilidad ha sido registrado de forma completa en la región, atendiendo a la magnitud de los sismos y a la cobertura espacio-temporal de estaciones del área de estudio. En otras palabras, el reparto del potencial sísmico se realizará solo en el periodo en el que el catálogo sísmico puede considerarse completo para cada rango de magnitud y en un intervalo de magnitudes determinado, denominado *Periodo de Completitud* [$PC(m)$] (Figura 3.12).
- El potencial sísmico de la falla que se sustrae del potencial sísmico regional para obtener el de la zona, no será el de toda la falla, sino solo aquel que haya sido registrado en el periodo en el que se considera que el catálogo es completo.

Del mismo modo, se debe identificar el intervalo de magnitudes que pueden haber sido registradas de forma completa en el catálogo, estableciendo una magnitud mínima de corte ($M_{\min}$) y una magnitud máxima de completitud (MMC), que se corresponde con la magnitud máxima del catálogo cuyo periodo de completitud ($PC(m)$) está contenido en el periodo de observación del catálogo (Figura 3.12).

La magnitud mínima de corte corresponde a la mínima bajo la cual se considera que los sismos no contribuyen al nivel de movimiento cuya excedencia se evalúa.

Figura 3.12. Esquema de un análisis de completitud, donde se observan los rangos de magnitud que han sido registrados completamente. Eje izq: año de referencia para cada rango de magnitud, izq. arriba: AOC = año origen del catálogo, izq. abajo: año actual; eje der.: periodo de completitud para cada rango de magnitud (PC(m)), der. arriba: POC = periodo de observación del catálogo.

Reparto de tasas entre fallas y zonas

Para estimar la tasa de momento sísmico acumulada en la falla, en ese intervalo de magnitudes de interés, se le asocia un modelo de recurrencia y un valor de beta inicial, posteriormente ajustado según la metodología. Esta misma asignación habrá que efectuarla también en la zona, estableciendo una relación entre los valores de beta de las fallas y de la zona de una misma región y permitiendo, de este modo, fijar una de ellas y calcular la otra a partir de la primera, siempre y cuando se conserve el equilibrio del modelo.

La tasa de momento sísmico total de la falla $\dot{M}_{o\text{falla}}$, será igual a la suma de la tasa de momento sísmica liberada en los distintos intervalos de magnitud que se pueden considerar en ella (Figura 3.13).

Figura 3.13. Tasa de momento sísmico total de la falla

El reparto de potencial sísmico entre las fallas y la zona se basa en dos principios fundamentales:

- La tasa de momento sísmico liberada por los sismos en una región es igual a la suma de la tasa de momento sísmico liberada por los sismos que se producen en todas las fallas contenidas en esa región, más la tasa de momento liberada por los sismos que ocurren en la zona y que no pueden ser asignados a ninguna falla, en el intervalo $[Mmin, MMC]$:

$$\dot{M}o_{región} [Mmin, MMC] = \dot{M}o_{zona} [Mmin, MMC] + \sum \dot{M}o_{falla} [Mmin, MMC] \quad [3-3]$$

- La tasa acumulada de sismos que se producen en una región es igual a la suma de las tasas acumuladas de sismos que se producen en todas las fallas contenidas en esa región, más la tasa acumulada de sismos que ocurren en la zona y que no pueden ser asignados a ninguna falla, en el intervalo $(Mmin, MMC)$:

$$\dot{N}min_{región} [Mmin, MMC] = \dot{N}min_{zona} [Mmin, MMC] + \sum \dot{N}min_{falla} [Mmin, MMC] \quad [3-4]$$

Tal como se ha hecho con la falla, asignando a la zona un modelo de recurrencia se puede conocer la tasa de sismicidad de la zona. El parámetro libre que queda por determinar en la ley de recurrencia es el valor β de la zona. En este caso, y siguiendo las recomendaciones de la autora, el valor del parámetro β asignado a la zona será igual al valor del parámetro β ajustado en la región por medio de la tasa de momento sísmico y de sismicidad (ajustando un modelo de recurrencia GR-modificada).

En el Anexo A de esta tesis se presenta una descripción más detallada incluyendo las formulaciones matemáticas para la aplicación de esta metodología.

3.3.3 Modelos de movimiento fuerte

Los modelos de movimiento fuerte o leyes de atenuación, conocidos como *GMPE* (del inglés, *Ground Motion Predictions Equations*) son modelos matemático-empíricos o teóricos, que describen la pérdida de energía de un sismo, en función de la relación fuente-trayectoria-sitio, así como de la distancia focal, magnitud del evento, mecanismo focal, entre otras variables, y constituyen un aspecto fundamental para determinar el movimiento del suelo en un emplazamiento determinado.

Estos modelos del movimiento son obtenidos por dos clases de métodos: métodos empíricos y métodos teóricos o analíticos. Los modelos más desarrollados y utilizados en la literatura especializada son los basados en métodos empíricos. Éstos están representados matemáticamente por una ecuación que permite predecir la variable del movimiento, usualmente aceleración máxima (PGA) o aceleraciones espectrales $SA(T)$, en función de la magnitud y la distancia, principalmente. Los registros de las bases de datos utilizadas para la formulación de los modelos suelen delimitar rangos de magnitud y distancia fuente-emplazamiento que son condicionantes para la utilización de los mismos, razón por la cual no es recomendable extrapolar dichos modelos fuera de los rangos establecidos.

Los modelos de atenuación suelen ser clasificados de acuerdo al régimen tectónico de la zona estudiada, distinguiéndose generalmente entre modelos corticales o de corteza, de subducción intermedia (interplaca) o subducción profunda (intraplaca) y de zonas volcánicas.

Considerando el tamaño de la base de datos y la localización geográfica de los registros acelerométricos utilizados, los modelos también pueden clasificarse en locales, regionales y globales. Los modelos globales son actualmente los de uso más extendido, puesto que son desarrollados con amplias bases de datos de distintas zonas del mundo, lo que permite su aplicación generalizada.

Distintos autores han desarrollado leyes de atenuación, considerando diversos parámetros y a partir de diferentes bases de datos de eventos sísmicos. A partir del año 2001, Douglas, J. (2001b) ha realizado una recopilación de ecuaciones robustas a nivel mundial, publicando por primera vez un compendio de todas las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte publicadas desde el año 1964 al año 2000, y manteniendo hoy en día, la base de datos actualizada hasta el año 2016, con un listado detallado de 422 *GMPE* empíricas para la predicción de PGA y 269 modelos empíricos para la predicción de otras ordenadas espectrales de respuesta elástica. Además, cuenta con un listado de 73 modelos analíticos para estimar PGA y ordenadas espectrales, aunque éstos no se encuentran detallados. La base de datos está disponible tanto en la web, como en su reciente publicación (Douglas, J., 2017). Cabe resaltar, que el autor de esta compilación no realiza un análisis crítico de los modelos,

las ecuaciones son publicadas de manera general en la misma forma utilizada en su referencia original y sólo se mencionan las limitaciones y rangos de aplicabilidad expuestos por sus propios autores.

La estimación de leyes de atenuación conlleva incertidumbre, ya que a menudo los datos que se ajustan a una determinada ley presentan una gran dispersión, siendo los resultados son más precisos para una cierta región cuanto mayor es la muestra de datos empleada. Los modelos actuales incluyen además de las variables de distancia, magnitud y ϵ , otras variables dependientes del tipo de suelo y mecanismo focal que acotan en cierta manera la incertidumbre de cálculo del parámetro de movimiento.

Para reproducir de forma óptima la atenuación, lo ideal es disponer de modelos propios desarrollados con datos registrados en la zona de aplicación y cubriendo los rangos de magnitud y distancia que de los terremotos que puedan esperarse. En el caso de la Península Ibérica, se han desarrollado modelos sencillos y de un rango de magnitud reducido, debido a la limitación de datos acelerométricos existente. Entre estos modelos se encuentran los publicados por Cabañas et. al (1999), Tapia (2006), Mezcu et. al (2008) y Ruiz et. al (2012), desarrollados a partir de datos españoles o de la cuenca del mediterráneo. Sin embargo, debido a que en España solo existen registros acelerométricos de sismos de magnitud baja o moderada, $M < 5.5$, no es posible desarrollar una ecuación para el rango completo de magnitudes que pueden esperarse. Para cubrir el rango de magnitudes más altas es preciso recurrir a modelos desarrollados con datos de otras regiones geográficas que, en la medida de lo posible, guarden la mayor afinidad tectónica con la zona del emplazamiento.

Actualmente, se tiende a desarrollar modelos de movimiento fuerte con grandes bases de datos que permiten incorporar un gran número de variables a la hora de definir la fuente sísmica y las características del sitio. Destacan entre estos, los modelos conocidos como *NGA (Next Generation Attenuation models)* del Proyecto “PEER NGA”, publicados por primera vez en el año 2008, y posteriormente, una segunda versión fue publicada en el año 2013 (NGA-West2).

3.3.3.1 Modelos de atenuación propuestos para aplicaciones en España

Teniendo en cuenta los condicionantes anteriores, en esta tesis se propone para el caso de la Península Ibérica, emplear un modelo propio construido con datos registrados en España, cuando el rango de magnitudes se encuentre entre $M_w 3.5$ y $M_w 5.5$, y combinarlo con otros modelos foráneos definidos para $M_w > 5.0$. Para seleccionar los modelos más idóneos, entre los propuestos en la literatura especializada, se propone efectuar un contraste de modelos con datos locales, que permita determinar cuáles de esos modelos reproducen mejor la atenuación de la zona a estudiar.

Entre todos los modelos encontrados en la literatura, se propone la segunda versión de los modelos de la NGA, conocida como NGA-West2 (*Next Generation Attenuation models (2013)*) para su posible aplicación en España, por ser modelos muy robustos que incluyen corteza continental como la existente en la zona central de la Península.

Las principales novedades que presentan con respecto a otros son:

- Incorporar el efecto de suelo a través del valor de V_{s30} y no de una categoría genérica.
- Incluir efectos de suelo no lineales dependientes de la profundidad de un determinado horizonte de velocidades.
- Distinguir entre el efecto de bloque superior e inferior de una falla (hanging-wall effect).
- Introducir el mecanismo focal de la fuente.
- Emplear un modelo detallado de incertidumbre.

Con el fin de mejorar tales modelos y dada la limitación existente para su aplicabilidad en zonas de moderada y baja sismicidad (como es el caso de España), durante el año 2013 se ha publicado una segunda versión NGA (NGA-West 2).

La base de datos del proyecto NGA-West2, se ha aumentado con datos de movimiento de todo el mundo registrados después de 2003. Se han incorporado terremotos importantes de diversas zonas del mundo, como el del L'Aquila (Mw6.3) de 2009, Alcalde-Cucupah (Mw7.2) e 2010, el de Christchurch (Mw6.2) de 2011, entre otros, duplicando el tamaño de la base de datos anterior para eventos de magnitud moderada a grande. La base de datos actualizada, cubre un rango de magnitud de entre 3.0 y 7.9, y un rango de distancias a la ruptura de 0.05 a 1.533 kilómetros.

Las velocidades de onda V_{s30} tienen un rango de 94 a 2100 m/s, distinguiendo entre valores inferidos o medidos. Incluye además, procesados uniformes de series de tiempo, 111 ordenadas espectrales de respuesta elástica desde el periodo 0.01 a 20 segundos, y distintas relaciones de amortiguamiento.

Los nuevos modelos NGA- W2 han sido publicados en Abrahamson et al. 2013 (ASK13), Boore et al. 2013 (BSSA13), Campbell y Bozorgnia 2013 (CB13), Chiou y Youngs 2013 (CY13) e Idriss 2013 (I13).

En la Tabla 3-2 se presentan los parámetros utilizados por cada uno de estos modelos. Como se puede observar, según los parámetros considerados por cada modelo, los modelos publicados por Campbell y Bozorgnia (CB13) y Abrahamson et al (ASK13) son los más completos y complejos de los cinco modelos propuestos en la NGA-West2, por los que son los más recomendables para su aplicación. El modelo de Chiou y Youngs (CY13) es el único de los cinco modelos que ha incluido el efecto de directividad, a través de la inclusión de un parámetro llamado parámetro de punto directo DPP (Chiou

y Spudich, 2013). Los modelos de Idriis (I13) y Boore et al. (BSSA13) son modelos mucho más sencillos, que no toman en cuenta la geometría y efecto del plano de ruptura como los otros tres modelos.

Tabla 3-2. Variables utilizadas por los modelos de la NGA W2. (Celda coloreada = parámetro incluido).

	ASK13	CB13	CY13	BSSA13	I13
Parámetros de la fuente					
Magnitud	+	+	+	+	+
Mecanismos	+	+	+	+	+
Buzamiento (dip)	+	+	+		
Ancho del plano de ruptura (W)	+	+			
Efecto <i>Hanging-wall</i> (HW)	+	+	+		
Centroide Rjb (CRjb)	+				
Indicador de réplica (Fas)	+				
Profundidad del plano de ruptura (Ztor)	+	(HW)	+		
Profundidad del hipocentro (Zhyp)		+			
Tipo de distancias					
Distancia Rx	+	+	+		
Distancia Joyner-Boore (Rjb)	+	+		+	
Distancia al plano de ruptura (Rrup)	+	+	+		+
Distancia Ry	+				
Distancia Ryo	+				
Efecto de sitio					
Vs30	+	+	+	+	+
Z1.0	+		+	+	
Z2.5		+			
Otros efectos					
Efecto de directividad			+		
Regionalización de la atenuación	+	+	+	+	+

Teniendo en cuenta la alta sensibilidad de los resultados a los modelos de atenuación que se apliquen en la zona de estudio, la elección de los mismos tiene una importancia especial, por lo que se recomienda realizar un contraste de modelos con significación estadística, siempre que se cuenten con registros de una base de datos acelerométrica propia de la zona. Entre las metodologías desarrolladas para este fin destacan las propuestas por Scherbaum et al. (2004), conocido también como *método LH*, Scherbaum et al. (2009) (*método LHH*), y la de Kale y Akkar (2012), las cuales han sido calibradas por los autores con datos observados en países europeos.

3.4 ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ROCA

Una vez definidas y caracterizadas las fuentes generadoras de sismos que puedan influir en la delimitación de la peligrosidad de un lugar determinado, y habiendo seleccionado uno o varios modelos de movimiento fuerte que mejor reproduzcan la atenuación de las ondas sísmicas desde estas fuentes hasta dicho emplazamiento, se cuenta entonces con todos los elementos necesarios para proceder a estimar la peligrosidad sísmica del sitio, inicialmente, en condiciones de roca.

El cálculo de la peligrosidad se propone a través de un enfoque híbrido probabilista-determinista, basado en la desagregación de la peligrosidad estimada con un planteamiento probabilista para encontrar los escenarios sísmicos que más contribuyen al movimiento con una cierta probabilidad de excedencia. La peligrosidad sísmica se estima, en primer lugar, aplicando la metodología probabilista PSHA, calculando la probabilidad de que los terremotos generados en las diversas fuentes produzcan un movimiento en el emplazamiento que iguale o rebase un nivel de amplitud preestablecido. El resultado se obtiene resolviendo la integral de peligrosidad descrita en el *Apartado 2.2.1 del Capítulo de Estado del arte* (ecuación [2-4]), que se refiere a un emplazamiento dado y se define como la probabilidad de excedencia de un valor dado del parámetro del movimiento.

Posteriormente, se realiza una desagregación de la peligrosidad estimada por el método probabilista, para identificar los escenarios sísmicos que más contribuyen y que constituyen los sismos de control (deterministas) que se plantean para los escenarios de riesgo sísmico a escala urbana.

A continuación se describen los métodos recomendados para la fase de estimación de la peligrosidad sísmica en roca.

3.4.1 Estimación probabilista de la peligrosidad

Como se expuso en el *Capítulo 2 - Estado de arte* de esta tesis, la peligrosidad sísmica, desde un enfoque probabilista, se representa mediante la probabilidad anual de excedencia de un nivel de movimiento, dependiente de tres variables: magnitud (m), distancia fuente-emplazamiento (r) y epsilon (ϵ). Más concretamente, el cálculo de la misma requiere sumar las contribuciones de aquellas ternas de valores, que efectivamente contribuyen a la excedencia del movimiento objeto (umbral fijado).

Estas variables se integran por medio de las funciones de densidad de probabilidad asociadas a ellas y son truncadas para unos valores máximos y mínimos, mediante la ecuación que se conoce como la triple integral de la peligrosidad. (Ecuación [2.4])

Una vez determinadas las funciones de densidad de probabilidad asociadas a cada variable y cada fuente, es posible resolver la ecuación de forma numérica, convirtiendo la triple integral en un sumatorio triple extendido entre los límites mínimo y máximo de variación de cada variable en cada fuente y los diferenciales por incrementos finitos, y se evalúan las funciones de densidad de probabilidad en los puntos centrales de las correspondientes celdas en las que se descomponga la integral.

La ecuación [2.4] pasa entonces, según el método zonificado, a tomar la forma:

$$\lambda_{TOTAL}(y > Y) = \sum_{Zona\ i}^{Zona\ n} Nmin_i H_i(\ln y - \ln Y) \sum_{Mmin}^{MmaxZonai} \sum_{Rmin}^{Rmax} \sum_{\epsilon min}^{\epsilon max} f_{Mi}(m_{med}) \times f_{Ri}(r) f_{\epsilon}(\epsilon_{med}) \Delta m \Delta r \Delta \epsilon \quad [3-5]$$

En el caso de la metodología híbrida de zonas y fallas, la ecuación [2.4] toma la forma de:

$$\lambda_{TOTAL}(y > Y) = \sum_{Zona\ i}^{Zona\ n} Nmin_i H_i(\ln y - \ln Y) \sum_{Mmin}^{MmaxZonai} \sum_{Rmin}^{Rmax} \sum_{\epsilon min}^{\epsilon max} f_{Mi}(m_{med}) \times f_{Ri}(r) f_{\epsilon}(\epsilon_{med}) \Delta m \Delta r \Delta \epsilon + \sum_{Falla\ i}^{Falla\ n} Nmin_i H_i(\ln y - \ln Y) \sum_{Mmin}^{Mmaxfallai} \sum_{Rmin}^{Rmax} \sum_{\epsilon min}^{\epsilon max} f_{Mi}(m_{med}) \times f_{Ri}(r) f_{\epsilon}(\epsilon_{med}) \Delta m \Delta r \Delta \epsilon \quad [3-6]$$

Conviene resaltar, que aunque en esta última metodología se ha establecido una magnitud máxima de completitud MMC para establecer el reparto entre las tasas de momento sísmico y sismicidad de las fallas y zonas de la región observada, las fuentes se incluirán en el cálculo de forma completa, es decir, estableciendo los límites de integración en magnitud de la falla entre la magnitud mínima de cálculo y la magnitud máxima esperada en la misma y en el caso de las zonas, entre la magnitud mínima de cálculo y la magnitud máxima que se considere posible en la zona.

3.4.2 Cuantificación de incertidumbres y Árbol lógico

La utilización de distintos modelos para representar las diferentes variables del cálculo de peligrosidad conlleva una incertidumbre que se encuentra presente en las diferentes fases de cálculo, desde la delimitación de las zonas sismogénicas, sus relaciones de recurrencia, la calidad de los datos, los

modelos de atenuación de las ondas sísmicas y las características físicas locales del emplazamiento, entre otras, que finalmente influyen en los resultados de peligrosidad.

Según la naturaleza de estas incertidumbres, las mismas se engloban en la definición de dos clases:

- Incertidumbres Aleatorias

Estas incertidumbres son debidas a la aparente aleatoriedad de los datos respecto a un cierto modelo. Dentro del análisis probabilista de la peligrosidad, éstas se consideran tomando en cuenta la desviación estándar de la relación que describe los modelos.

Estas incertidumbres se han incorporado al cálculo propuesto en función de la metodología. En el caso del método zonificado, las incertidumbres aleatorias asociadas a la magnitud de los eventos se incorporan a través de un proceso estocástico de Montecarlo a la hora de ajustar el modelo de recurrencia de sismicidad en la zona, simulando un número elevado de catálogos que reciben un valor de M_w escogido por aleatoriedad de acuerdo a la función de probabilidad de distribución asumida.

La incertidumbre asociada a las magnitudes máximas de las zonas se incluyeron como una función de distribución gaussiana, definida por los parámetros expuestos en el Apartado 3.3.2.1.

En el caso de la metodología híbrida, por recomendación de la autora, se han considerado las incertidumbres asignando una función de distribución triangular de probabilidad a las mismas a la hora de obtener la tasa de momento sísmico de la región asociada a la sismicidad observada en el catálogo.

La aleatoriedad en la propagación de las ondas sísmicas es considerada mediante la desviación estándar del modelo de atenuación utilizado.

- Incertidumbres Epistémicas

Este tipo de incertidumbre está vinculado a la diferencia existente entre el modelo teórico propuesto y el modelo funcional real.

En el cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica, la falta de conocimiento de la geometría y actividad sísmica de las fuentes se considera tomando en cuenta dos métodos para modelizar las fuentes, uno basado en zonas sismogénicas y otro incluyendo las fallas como fuentes independientes, donde este último representa un enfoque más real, aunque un método menos contrastado en la literatura.

De acuerdo a la elección del modelo de propagación de ondas se proponen diferentes relaciones de atenuación como opciones a considerar en el cálculo del movimiento fuerte.

El método más utilizado para solventar el problema que conlleva este tipo de incertidumbres en estudios de peligrosidad, siguiendo el tipo de análisis conocido como PSHA, es el denominado árbol lógico, en el que se integra el juicio de expertos para llegar a un consenso sobre la verosimilitud de las opciones alternativas.

El árbol lógico está compuesto por una serie de nodos y ramas (Figura 3.14). Cada nodo representa la estimación de una opción de cálculo o un estado del proceso que debe ser ejecutado en el estudio, cuya incertidumbre se desea cuantificar. Cada rama que parte de un nodo representa una posible alternativa y lleva asignada un peso o valor de probabilidad que indica el grado de credibilidad de que la rama represente el modelo correcto. Se asume que entre todas las ramas que conducen a un nodo se encuentra el modelo real, por lo que la suma de todos los pesos debe ser la unidad (Benito et al., 2012).

Figura 3.14. Esquema general de un árbol lógico para la estimación de la amenaza sísmica.

3.4.3 Curvas de peligrosidad y espectros de respuesta

Los métodos probabilistas de evaluación de la peligrosidad dan como resultado una curva que representa las probabilidades de excedencia de determinados niveles de movimiento en cada punto a causa de la ocurrencia de terremotos en cualquiera de las zonas sismogénicas englobadas en la zona de influencia. Estas curvas son conocidas como **curvas de peligrosidad** y suelen ser representadas en función del periodo de retorno, definido como la inversa de la probabilidad anual de excedencia.

Los resultados de peligrosidad en un cierto emplazamiento se suelen representar de acuerdo al parámetro elegido para representar el movimiento. La aceleración pico (PGA) es el parámetro de movimiento más utilizado en ingeniería, puesto que es el parámetro básico en normativas sísmicas.

Además, durante un terremoto, el daño en los edificios y las infraestructuras está íntimamente relacionado con la velocidad y la aceleración sísmica, y no con la magnitud del sismo.

Los resultados de peligrosidad suelen, por tanto, representarse en términos de la aceleración pico del terreno PGA (del inglés, *Peak Ground Acceleration*), aunque como esta no da información contenida frecuencial del movimiento, necesario para fines de diseño sismorresistente y evaluación de estructuras, también se suelen presentar los resultados para diferentes ordenadas espectrales de respuesta elástica. Para estudios dirigidos a la evaluación del riesgo sísmico a escala urbana, para viviendas convencionales, se suelen representar los valores correspondientes a periodos estructurales de 0.1s hasta 5s, dependiendo del tipo de estructuras.

Los valores obtenidos en las curvas de peligrosidad corresponden a los valores medios ponderados de la distribución de estimaciones de peligrosidad resultantes de todo el árbol lógico.

Por otra parte, para fines de ingeniería sísmica, la representación mas completa del movimiento es el **espectro de respuesta**, que representa la respuesta máxima de una serie de osciladores de un grado de libertad con periodo T y amortiguamiento ζ dado como fracción del crítico (5% suele ser el más utilizado). Para cada periodo T o frecuencia se representa la respuesta máxima en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento.

Los espectros de respuesta obtenidos del estudio probabilista de la peligrosidad son denominados espectros de peligrosidad uniforme o espectros *UHS* (del inglés, *Uniform Hazard Spectrum*) y son obtenidos para los periodos de retorno fijados, elegidos generalmente en función de la importancia de la estructura. Para un cierto periodo de retorno, el correspondiente *UHS* se deriva cortando las curvas de peligrosidad de las diferentes ordenadas espectrales $SA(T)$ a una misma probabilidad, y deduciendo así los valores que permiten construir el espectro “punto a punto”.

Actualmente, el espectro de respuesta es la base en la mayoría de los reglamentos de diseño sísmico en el mundo para establecer las fuerzas de diseño con las que se proporciona la rigidez y resistencia a las estructuras.

En estudios de peligro y riesgo sísmico el interés se centra en estimar el espectro de respuesta que cabe esperar por sismos futuros. Estos espectros, obtenidos inicialmente en condiciones genéricas de roca, deben ser multiplicados por los correspondientes coeficientes de amplificación, según los tipos de suelos hallados en el emplazamiento, para obtener finalmente los espectros de respuesta que se generarían en la superficie del terreno. La caracterización del movimiento de suelo por medio de estos

espectros es, generalmente, el paso final de todo estudio de peligrosidad dirigido al análisis de respuesta de las estructuras, abordado entonces desde un punto de vista ingenieril.

3.4.4 Desagregación

Como se expuso en el *apartado 2.2.2.3. del Capítulo 2*, la desagregación de la peligrosidad consiste en determinar el o los sismos de control que con mayor probabilidad causarán la excedencia del movimiento en el emplazamiento o población de estudio, para el periodo espectral considerado. Determinar las características de este sismo requiere encontrar el conjunto de valores de las variables magnitud, distancia y épsilon, en adelante denominado par (m, r, ϵ) , que presentan mayor contribución a la peligrosidad.

En estudios de riesgo a escala municipal, la acción sísmica se debe asociar a un escenario sísmico concreto y no solo a una estimación probabilista en la que la contribución a la peligrosidad de varias fuentes impide identificar de forma directa el terremoto específico que causa el riesgo a calcular. Por esta razón, se propone extraer de la desagregación, los sismos de control que definan los escenarios a plantear para su correspondiente estimación del riesgo sísmico. En primer lugar, determinar el sismo de control correspondiente al **sismo más probable**, generalmente asociado a un periodo de retorno de 475 años, es decir, el sismo con un 10% de probabilidad de ser excedido en 50 años, tal como establecen la mayoría de las normativas sismorresistentes; y por otra parte, un sismo de control asociado a un **sismo extremo**, por lo general, correspondiente a un periodo de retorno de 975 años, o 5% de excedencia en 50 años. Al mismo tiempo, se recomienda analizar la desagregación para cortos periodos de ordenada espectral (PGA y/o $S_a 0.1s$) y para largos periodos ($S_a 1s$).

3.5 CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO LOCAL

En estudios a escala urbana, la caracterización del efecto de suelo debe ser todo lo pormenorizada posible (en función de las limitaciones del proyecto), aumentando el trabajo empírico sobre el terreno y limitando las extrapolaciones estadísticas en la medida de lo posible. En este ámbito, el desarrollo de medidas in situ encaminadas a cuantificar el efecto de sitio (como estructuras de velocidades de ondas de cizalla promedio en los 30 metros más superficiales (V_{s30}) y periodos predominantes del suelo (Navarro et al., 2001)) y de los periodos de vibración natural de estructuras (Navarro et al., 2007), ayudan a cartografiar las zonas donde se pueden prever efectos de resonancia por la superposición de los movimientos naturales del suelo y de las edificaciones con los de la acción sísmica dentro de un mismo rango espectral (Gaspar-Escribano et al. 2010).

Los efectos de sitio pueden llegar a tener gran influencia en la estimación del movimiento fuerte de un emplazamiento, ya que la ya que las estructuras sedimentarias bajo el mismo pueden provocar una significativa amplificación de las ondas sísmicas. Por regla general, la presencia de terrenos blandos no consolidados de gran potencia produce un aumento considerable de los daños generados por terremotos en las estructuras situadas sobre ellos, al condicionar la amplificación de las ondas sísmicas. Este comportamiento se debe fundamentalmente a las propiedades dinámicas de estos materiales, como son la rigidez (G) y la velocidad de onda de cizalla (V_s). Estos efectos no solo influyen en el aumento de la amplitud de las ondas, sino también en la prolongación de la duración de la sacudida y en el contenido frecuencial.

Otros factores muy importantes son el factor topográfico o de geometría de las cuencas, profundidad de la roca firme y distancia al borde. En esa tesis no se han incluido estos aspectos topográficos, limitándose solo a los efectos de amplificación debido a las condiciones litológicas. Para este fin, se describen los métodos para clasificar los materiales bajo criterios geológicos-geotécnicos que permitan caracterizar el comportamiento sísmico de los materiales geológicos del sitio, delimitando zonas con diferentes grados de amplificación sísmica.

3.5.1 Geología del terreno

La evaluación del efecto local o de sitio requiere conocer la composición del suelo en el emplazamiento, a efectos de caracterizar su comportamiento ante la sacudida sísmica. Para esto, es fundamental realizar previamente una clasificación geotécnica, la cual consiste en agrupar los

materiales geológicos superficiales en categorías de respuesta sísmica similar con la consiguiente elaboración de mapas de clasificación geotécnica-respuesta sísmica.

La respuesta sísmica y el grado de amplificación de los distintos tipos de materiales geológicos superficiales están controlados principalmente por sus propiedades geotécnicas, estimadas a partir de su edad, composición, origen y situación con respecto a otras formaciones geológicas. También es fundamental considerar el espesor de los materiales, el grado de fracturación y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso. De todas las categorías establecidas, los suelos blandos, no consolidados y de edad reciente, son los que presentan mayor relevancia en cuanto al efecto local, ya que son los que pueden generar una mayor amplificación de las ondas sísmicas. A este respecto, se deben tener en cuenta, además, otros aspectos geotécnicos como el espesor de los depósitos blandos, la profundidad del nivel freático, la cohesión, la expansividad de las arcillas y la presencia de materia orgánica. Es decir, que los suelos poco consolidados (terrenos aluviales, depósitos recientes poco cohesionados) tienden a amplificar mucho el movimiento, mientras que los terrenos compactos apenas lo amplifican.

Este proceso requiere la agrupación y clasificación de la variedad de materiales geológicos presentes en el sitio en categorías con respuestas sísmicas similares en base a las características geológicas y a las propiedades dinámicas propias de cada categoría, especialmente de la Velocidad de las ondas de cizalla (V_s), para así tratar de identificar las zonas potencialmente susceptibles a la amplificación de las señales sísmicas.

Para esto, es necesario partir de un mapa de cartografía geológica que aporte datos en detalle de los depósitos cuaternarios en la región en cuanto a su textura, posición, espesor, origen y medio de sedimentación, los cuales ayudarán a identificar los sitios óptimos para efectuar medidas in-situ que permitan obtener funciones de transferencia y/o perfiles de velocidad de onda s para obtener los parámetros necesarios para cuantificar el efecto local del emplazamiento.

En España, se puede consultar para este fin la información geológica disponible en el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

3.5.2 Modelos V_s

La obtención de modelos de velocidad de propagación V_s supone una información de gran utilidad en materia de riesgo sísmico a escala urbana y reconocimiento general de la estructura y naturaleza del subsuelo en un emplazamiento. El valor medio de la propagación de la onda de cizalla s en los primeros 30 metros, conocido como V_{s30} , constituye un parámetro mundialmente aceptado para la clasificación

de suelos, por la estrecha relación que guarda con la rigidez del suelo y el contraste de impedancias con la amplificación (Anderson et. al 1996, Wills y Silva, 1998, Navarro et. al 2001). A partir de estos modelos, también es posible calcular por simulación numérica la frecuencia a la cual se produce el máximo factor de amplificación sísmica y el periodo fundamental correspondiente.

La velocidades de propagación de la onda s se hallan matemáticamente relacionadas con las ondas superficiales observadas mediante distintas técnicas. Su observación permite el análisis espectral de los registros adquiridos, obteniéndose un modelo representado por la curva de dispersión de cada emplazamiento, de modo que mediante inversión se obtiene el modelo de velocidad de propagación en función de la profundidad. A través de estos modelos, se obtienen otros parámetros de interés sísmológicos. Estos resultados se representan sobre mapas isométricos para obtener una relación espacial de los mismos, lo que se conoce como microzonación sísmica.

La determinación de perfil de V_s y el resultante promedio armónico V_{s30} que caracteriza a un sitio, se puede resumir en tres etapas (SESAME Group, 2005):

- Etapa de adquisición de datos en terreno: Involucra la definición de la geometría de los arreglos de geófonos, del tipo de geófonos de la fuente a considerar y de la duración de los registros (cantidad de ensayos según terreno).
- Etapa de análisis de datos: Involucra el análisis de los datos adquiridos en terreno mediante algún método de ondas superficiales apropiado para la estimación de la curva de dispersión.
- Proceso de Inversión: Una vez obtenida la curva de dispersión se procede a la inversión para determinar un perfil de velocidades apropiado y calcular el parámetro V_{s30} .

3.5.2.1 Cálculo de la V_{s30}

El criterio de clasificación de suelos utilizado más ampliamente está basado en las velocidades de onda de cizalla media en los primeros 30 metros de perfil de suelo (V_{s30}).

Una vez obtenidos los perfiles de distribución de la velocidad V_s en función de la profundidad a través de técnicas como las descritas en el *Apartado 2.2.2*, se puede obtener la velocidad de propagación V_{s30} , que permitirá clasificar el suelo según el código o norma correspondiente. Los resultados obtenidos de estos perfiles expresan los parámetros físicos y el espesor aproximado de cada capa de material en el subsuelo.

La V_{s30} es calculada como el tiempo que toma la onda de cizalla en viajar de una profundidad de 30m a la superficie del suelo, no como la media aritmética de la V_{s30} a una profundidad de 30m. La V_{s30} se

calcula dividiendo los 30 m entre la suma de los tiempos de viaje de la onda V_s a través de cada capa. El tiempo en cada capa se estima como el espesor de la capa (d) entre la V_s . (PEER, Wair et. al, 2012). De este modo, la ecuación de cálculo es:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{V_{s_i}}} \quad [3-7]$$

Donde d_i representa el espesor (en metros) de cada capa de suelo del perfil hasta alcanzar los 30 m de profundidad, V_{s_i} es la velocidad de onda cortante de cada capa i (en m/s) y N el número de capas hasta alcanzar los 30 m.

Con el valor de la V_{s30} es posible inferir el tipo de suelo según las clasificaciones adoptadas por la mayoría de códigos y normativas sismorresistentes internacionales (*Norma de Construcción Sismorresistente Española* NCSE-02, *Eurocódigo-8* (EC8), *International Building Code IBC* (ICC 2015), *American Society of Civil Engineers* (ASCE 2006, 2010), etc).

La clasificación de suelos adoptada en esta tesis es la basada en la clasificación definida por el *National Earthquake Hazard Reduction Program* (NEHRP)(BSSC 2009), consistente con muchas de las nomativas antes mencionadas y utilizada en los modelos de movimiento fuerte (*GMPE*) globales más recientes, como es el caso de los modelos de la *NGA-West2*, expuestos en el *Apartado 3.4.1.* de esta propuesta metodológica, motivo por el cual es la clasificación de suelos mayormente utilizada a nivel internacional.

La Tabla 3-3 muestra la clasificación de suelos del NEHRP y su correspondencia con la clasificación de suelos del Eurocódigo-8 y la Norma de diseño Sismorresistente de España, NSCE-02.

Tabla 3-3. Tabla de clasificación de suelos del NEHRP y su correspondencia con la clasificación de la NSCE-02 y Eurocódigo 8 (EC8). (Licuef. = Licuefacción).

TIPO DE SUELO			DESCRIPCIÓN GENERAL	V_{s30} (m/s ²)		
NEHRP	EC8	NCSE-02		NEHRP	EC8	NCSE-02
A	A	I	Roca dura	>1500	>800	>750
B			Roca medio dura	760-1500		
C	B	II	Suelo muy denso y roca blanca	360-760	360-800	400-750
D	C	III	Suelos rígidos	180-360	180-360	200-400
E	D	IV	Suelo medio a blando	<180	<180	<200
F	E		Suelos especiales	Licuef.	Licuef.	

3.5.3 Factores de amplificación

Una vez clasificados los materiales se debe estimar su grado de amplificación relativa al movimiento sísmico. Dicha amplificación depende de la velocidad de ondas de cizalla (VS), siendo en general mayor cuanto menor sea ésta. De este modo, los materiales más blandos, de velocidades VS más pequeñas, tienden a producir mayores amplificaciones.

De acuerdo a la clasificación de suelos establecida, se procede a aplicar los factores de amplificación adoptados por las especificaciones del NEHRP (2009) sobre las diferentes ordenadas espectrales. El NEHRP (2009) cuantifica dichos factores de amplificación para PGA para largos y cortos periodos del movimiento para cada tipo de suelo definido. Estos factores son mostrados en la Tabla 3-4. Como se puede ver, el factor de amplificación para cada tipo de suelo (tanto para cortos como largos periodos) depende del valor de aceleración de entrada (sin aplicar el efecto local), de forma que el factor de amplificación varía en función de este valor de aceleración de entrada. Para aquellos valores de aceleración intermedios, se propone una interpolación lineal para la obtención del factor de amplificación.

Tabla 3-4. Factores de amplificación para diferentes tipos de suelo, periodos estructurales y valores de aceleración base según la clasificación de suelo del NEHRp (2009).

Site Clas s	Mapped MCE Geometric Mean Peak Ground Acceleration, PGA				
	PGA ≤ 0.1	PGA = 0.2	PGA = 0.3	PGA = 0.4	PGA ≥ 0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	0.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	See Section 11.4.7				

Site Clas s	Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period				
	Ss ≤ 0.25	Ss = 0.5	Ss = 0.75	Ss = 1.0	Ss ≥ 1.25
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	0.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	See Section 11.4.7				

Site Clas s	Spectral Response Acceleration Parameter at 1-Second Period				
	S1 ≤ 0.1	S1 = 0.2	S1 = 0.3	S1 = 0.4	S1 ≥ 0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	See Section 11.4.7

Como se puede observar en la Tabla 3-3, según los valores de amplificación del NEHRP, la amplificación en cada tipo de suelo para PGA y para las diferentes ordenadas espectrales varía en función del movimiento de entrada. En el caso de PGA, los suelos blandos amplifican notablemente los movimientos con baja aceleración de entrada en roca (aceleraciones menores a 0.3g), mientras que para ordenadas espectrales de 0.1s, estas amplificaciones se mantienen hasta los movimientos con aceleraciones de entrada de 0.75g. Para movimientos correspondientes a largos periodos, se observa que los suelos blandos pueden llegar a duplicar o triplicar las aceleraciones de entrada.

3.5.4 Estimación de la peligrosidad sísmica incluyendo el efecto local

Como paso último del cálculo de peligrosidad probabilista, los factores de amplificación $FA(T)$ correspondientes a cada tipo de suelo se aplican sobre los valores de aceleración obtenidos en roca $Sa(T)_{roca}$, para obtener de este modo la peligrosidad sísmica final incluyendo el efecto local $Sa(T)_{suelo}$, mediante la siguiente expresión.

$$Sa(T)_{suelo} = FA(T) * Sa(T)_{roca} \quad [3-8]$$

En el caso de los escenarios deterministas generados a partir de los sismos de control obtenidos de la desagregación, los modelos de movimiento fuerte publicados por la Next Generation Attenuation (NGA-West2) propuestos, incorporan el efecto de sitio por medio de valores específicos de Vs30 (asociados a la clasificación de suelos del NEHRP (2009)), por lo que el proceso de modelización de la fuente y aplicación de estos modelos, según el método determinista, da como resultado directo los espectros de respuesta específicos en la superficie del terreno. Por lo tanto, no es necesaria la aplicación de factores de amplificación en este caso.

La Figura 3.15 muestra un ejemplo de peligrosidad sísmica incluyendo el efecto local, al combinar el mapa de peligrosidad en roca con el mapa de amplificación del terreno.

Figura 3.15. Ejemplo de peligrosidad sísmica incluyendo el efecto local. a) (arriba izq.) mapa de peligrosidad sísmica en un emplazamiento genérico en roca, b) (abajo izq.) mapa de amplificación del terreno en función del periodo y del movimiento de entrada. b) (der.) mapa de peligrosidad sísmica incluyendo el efecto de sitio.

3.6 EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD

Una vez establecida la peligrosidad sísmica o movimiento esperado en la población expuesta al riesgo, es necesario evaluar los elementos expuestos y la vulnerabilidad de los mismos ante dicho movimiento, para así poder estimar la afectación o daño que previsiblemente experimentarán las estructuras ante la ocurrencia del sismo correspondiente al escenario considerado.

Un estudio de riesgo sísmico requiere la construcción de una base de datos georreferenciada con un gran volumen de información referente a los elementos en exposición ante un evento sísmico. Éstos son fundamentalmente el parque inmobiliario, necesario para estimar la vulnerabilidad de las estructuras, y la densidad de población, necesaria para estimar las víctimas potenciales. Concretamente, la información necesaria para generar una base de datos completa del parque inmobiliario requiere catalogar datos referentes a la localización de los edificios y viviendas, el entorno en el que están ubicadas (rústico o urbano), la cuantificación de la superficies construidas, el año de construcción y el número de plantas de los edificios. Estos dos últimos datos son necesarios para poder asignar la vulnerabilidad de los edificios y así estimar el comportamiento que tendrían ante un cierto movimiento esperado. En el caso de la densidad de población, es necesario conocer la distribución geográfica de los habitantes.

La asignación y distribución de la vulnerabilidad, teniendo en cuenta la exposición, es el objeto de la siguiente fase del cálculo en un estudio de riesgo sísmico. A continuación se presentan las fases a seguir para la recopilación de datos, la información necesaria y metodología recomendada para la asignación de vulnerabilidad de los edificios, requerida para la estimación de daños.

3.6.1 Construcción de la base de datos georreferenciada (SIG)

Para la realización de un estudio de riesgo sísmico en el que se analizan e interactúan diferentes variables espaciales, es imprescindible dar a todas ellas una correcta ubicación geográfica, complementada con las características que las identifican. Para ello, es necesario diseñar y desarrollar un Sistema de Información Geográfica (SIG), que facilite el análisis y representación de la información de la base de datos en un mismo sistema de referencia.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una integración organizada de herramientas, datos geográficos y recursos humanos, diseñado para almacenar, editar y analizar información geográficamente referenciada, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión.

A continuación se detallan los atributos sobre los elementos expuestos necesarios para elaborar el SIG con la base de datos de exposición.

Exposición de edificaciones

La base de datos de edificios expuestos debe contener información lo más detallada posible relativa a las diferentes estructuras. Entre las características de las edificaciones que se deberían conocer para una evaluación aproximada del daño, en lo posible, se encuentran:

- Altura y/o número de plantas
- Área construida (m²)
- Estructura principal de la edificación (Hormigón armado, mampostería)
- Tipo de entrepiso
- Tipo de cubierta
- Material de muros
- Tipo de fachada
- Fecha de construcción
- Norma o código de diseño
- Estado actual
- Reparaciones o refuerzos
- Irregularidades de geometría
- Uso

No obstante, en la práctica no siempre es posible recopilar tantos datos. Se tiende entonces a reducir los parámetros para la asignación de vulnerabilidad a los tres datos más determinantes del comportamiento del edificio ante un movimiento sísmico, en base a las metodologías de análisis de riesgo sísmico, que son:

- Los materiales de construcción de la estructura y los cerramientos. (en adelante “tipología constructiva”)
- El año de construcción
- El número de plantas (altura del edificio) cuando se vaya a realizar el trabajo de riesgo con metodologías que penalicen la altura (Índice de vulnerabilidad (EMS-98), HAZUS (FEMA 440), análisis *push-over*, etc.)

Existen varias agencias estatales y autonómicas que poseen datos sobre el parque inmobiliario de una ciudad. En el caso de España, resaltan principalmente el Instituto Nacional de Estadística (INE) y el

Catastro. El INE realiza campañas sobre las características de los edificios con abundante información, de carácter útil para la realización de un estudio de vulnerabilidad.

A diferencia de la base estadística del INE, donde la unidad de trabajo es un 'edificio', la unidad de trabajo de Catastro se basa en sus registros catastrales y áreas que pueden o no componer en su conjunto uno o varios edificios, obligando a varias hipótesis de partida para generar un conteo de edificios desde la base alfanumérica de Catastro.

Una vez recopilados los datos del parque inmobiliario, es importante definir la unidad de trabajo para el cálculo del riesgo. La unidad de trabajo no tiene porqué ser igual que la unidad de representación que se determine a la hora de exponer los resultados. La primera define la unidad en la que se van a efectuar los cálculos, lo que va a depender de la información de partida y los datos recopilados, mientras que la última va a depender de la forma y extensión superficial del territorio.

Por ejemplo, si se recopilan datos muy detallados de las edificaciones y los estudios geotécnicos indican la presencia de distintos tipos de suelo en el sitio (lo cual haría que la peligrosidad de entrada sea muy diferente en un edificio que otro), la unidad de cálculo ideal sería el edificio, puesto que así podríamos caracterizar su comportamiento de manera más realista. Sin embargo, como el comportamiento de los edificios ante la excitación sísmica se determina para diferentes probabilidades asociadas a distintos grados de daño, los edificios requieren ser agrupados para poder obtener de manera estadística números globales por cada grado de daño. En estudios a gran escala, generalmente no se cuenta con información detallada de los elementos y materiales de cada edificio, por lo que la unidad de cálculo recomendada es una unidad mayor al edificio, como manzanas o secciones censales, evitando siempre perder resolución del suelo, es decir, que cada unidad de trabajo presente un mismo tipo de suelo. Puesto que un núcleo urbano puede contar con un número muy elevado de manzanas o secciones censales, los resultados pueden agruparse en una unidad más grande de acuerdo a la extensión del terreno (como barrios o distritos), la cual constituiría la unidad de representación de resultados.

Por otra parte, hoy en día es prácticamente imposible obtener información exacta y georreferenciada de la tipología constructiva de todos los edificios dentro de un parque inmobiliario, por lo que hay que emplear medidas para estimar la distribución de tipologías constructivas en el emplazamiento estudiado, ya sea a través de muestras de campo o de acuerdo a la información que se haya logrado recopilar de las edificaciones.

A continuación se exponen algunas recomendaciones de acuerdo al contenido de los datos catastrales

y de fuentes estadísticas recopilados:

- En caso de que la información de registros catastrales o estadísticos del parque inmobiliario sea escasa, la primera opción es considerar la realización de una campaña de campo en la población objeto de estudio, para identificar las tipologías constructivas presentes en el núcleo urbano y evaluar la distribución de las mismas en los diferentes sectores de la ciudad. Esto requiere un análisis previo de los diferentes barrios que conforman el núcleo urbano, realizando una sectorización que permita establecer prioridades para el muestreo, y si es posible, elaborar fichas técnicas con información estructural e imágenes que faciliten el reconocimiento de las tipologías en campo. Se recomienda consultar previamente bibliografía de arquitectura popular de la región. La visita de campo debe ser dirigida por un profesional de la ingeniería civil o arquitectura, que pueda reconocer y determinar las características constructivas de los edificios.

Las distribuciones porcentuales observadas serán multiplicadas por el número de edificios total en las unidades de trabajo establecidas, y en su caso, extrapoladas a los sectores de la ciudad que no se hayan podido abarcar en la campaña, y que presenten las mismas tendencias constructivas o nivel socioeconómico que los sectores evaluados.

- En el caso de no ser posible una campaña de campo, otra opción, aunque más laboriosa, es identificar patrones de tipologías constructivas, con el apoyo de herramientas como Google StreetView u OpenStreetMap, en diferentes sectores del núcleo urbano.
- En la medida de lo posible, se debe contar con el criterio de expertos de arquitectos o ingenieros civiles locales que conozcan las prácticas constructivas propias del sitio y la evolución del parque inmobiliario, pudiendo determinar el porcentaje de edificios que pertenecen a cada tipología, de acuerdo al año de construcción de los mismos.
- En caso de no contar con el año de construcción de los edificios, estos se pueden estimar utilizando la huella temporal de crecimiento de la ciudad, a través de ortofotos o capas vectoriales de crecimiento del núcleo urbano en diferentes épocas de tiempo.
- Una vez identificadas las tipologías constructivas existentes en el sitio, se puede estimar la distribución porcentual de las mismas y su nivel de diseño sismorresistente, a partir de la edad de las edificaciones y de un estudio de la evolución temporal en la implementación de normativas sismorresistentes en la región.

Población

El número de habitantes que ocupan las viviendas estudiadas es un dato necesario para estimar las víctimas mortales y heridos asociados a los escenarios de riesgo sísmico. Generalmente, la fuente primaria para obtener estos datos es a través de los censos de población.

3.6.2 Estimación de la vulnerabilidad de los edificios

Para poder estimar el daño sobre el parque inmobiliario que conforma un núcleo urbano ante una sacudida sísmica, se requiere una clasificación de la vulnerabilidad de los edificios que lo componen, lo que obliga a determinar las tipologías constructivas, atendiendo a su comportamiento sismorresistente y clasificar las mismas de acuerdo a alguna de las tipologías constructivas cuyo comportamiento ante sismo haya sido avalado por la literatura científica.

La evolución de las normas sismorresistentes de un país, proporciona información de utilidad para la asignación de clases de vulnerabilidad en función del año de construcción, ya que la aparición de nuevas normas marca, por lo general, el comienzo del desarrollo de clases menos vulnerables.

Las metodologías desarrolladas para el cálculo del riesgo sísmico a escala urbana existentes en la literatura diferencian las edificaciones de acuerdo a su nivel de diseño sismorresistente (edificaciones sin diseño sismorresistente (DSR) o *“pre-code”*, con bajo nivel de DSR o *“low-code”*, con nivel moderado de DSR o *“moderate-code”* y con nivel alto de DSR o *“high-code”*), que pueden definirse en función de la normativa de construcción del momento. Por ello es importante conocer la evolución de las normativas del país, a la hora de asignar las clases de vulnerabilidad.

En el caso de España, las normas sismorresistentes (NNSS) de obligado cumplimiento datan de 1962, constituyendo ésta una fecha útil para diferenciar el tipo de edificaciones presentes en la región.

Entre las edificios de viviendas convencionales encontrados en los núcleos urbanos de España se pueden distinguir dos grandes clases (Flores, 1973; Murphy, 2008):

- Edificaciones tradicionales, basadas en prácticas constructivas de tradición empírica, avalada por los buenos resultados durante siglos. Tradicionalmente, la estructura de los edificios de vivienda se ha realizado mediante un sistema de muros de carga que sirven de apoyo a otros elementos del edificio (forjados y la estructura de los tejados) y transmiten su peso a la cimentación, que suele consistir en una zapata corrida. Los muros se construían con distintos materiales (tapia de barro, piedras, ladrillos, sillares, etc.). Estos edificios se apoyan en conceptos de buena práctica constructiva y forman la mayor parte de la edificación tradicional realizada con anterioridad a las décadas de los 40 o 50.
- Edificaciones tecnológicas, realizadas con procedimientos de cálculo donde los esfuerzos sobre la estructura son previstos y se desarrollan soluciones específicas para ello. Estos edificios están formados por un sistema de pilares y vigas, que suele ser de hormigón armado o de acero. La implantación de la etapa tecnológica sucede a lo largo de varias décadas, pero es útil relacionarla con la publicación de las primeras normas sismorresistentes españolas, que entraron en vigor a partir del

año 1962.

Estas edificaciones deben analizarse para determinar sus prestaciones sismorresistentes. El primer caso corresponde a prestaciones sismorresistentes accidentales, pues antiguamente no se diseñaba para resistir las acciones sísmicas, si bien el ejercicio de principios de buena práctica constructiva puede resultar en comportamientos sismorresistentes sensiblemente mejorados. En el segundo caso, las edificaciones responden a exigencias de cálculo y diseño determinados por las normas tecnológicas de obligado cumplimiento, que han ido variando a lo largo de los años en términos de contenido y aplicación.

Actualmente la norma sismorresistente NCSE-02 es de obligado cumplimiento en zonas de aceleración básica (a_b) superiores a 0.04 g. Estos valores de aceleración son considerados bajos, lo que se corresponde con un código considerado de DSR bajo o *“low-code”*, de acuerdo a la clasificación de diferentes metodologías, como FEMA (FEMA-440) o Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski (2003)),

Una vez elaborada la base de datos de exposición y definidas las tipologías constructivas presentes de la ciudad, tomando en cuenta su nivel de diseño sismorresistente, se procederá a asignar la vulnerabilidad a cada edificio mediante la aplicación de matrices de transferencia.

Las matrices de transferencia permitirán la asignación de vulnerabilidad sobre la base estadística de los edificios, estableciendo una probabilidad de cada clase o tipología constructiva en función de la fecha de construcción.

El primer paso obliga a caracterizar las tipologías observadas en el sitio de acuerdo a las tipologías constructivas existentes en los métodos de vulnerabilidad. (Tabla 3-5)

Tabla 3-5. Ejemplo de matriz de transferencia para determinar las equivalencias de las tipologías constructivas del sitio a los tipos de vulnerabilidad de la escala macrosísmica EMS 98 y Metodología Risk-UE.

TIPOLOGÍA PROYECTO	TIPOLOGÍA EMS 98 / RISK-UE	NÚMERO DE PLANTAS			
		1 – 2	3 – 5	6 – 7	8 O MÁS
MPFM	EMS 98	A	A	-	-
	RISK-UE	M1.1 L	M1.1 M	-	-
MAFM	EMS 98	A	A	-	-
	RISK-UE	M1.1 L	M1.1 M	-	-
MLFM	EMS 98	B	B	B	B
	RISK-UE	M3.4 L	M3.4 M	M3.4 H	M3.4 H
MLFH	EMS 98	B	B	B	B
	RISK-UE	M3.4 L	M3.4 M	M3.4 H	M3.4 H
HPAL	EMS 98	C	C	C	C
	RISK-UE	RC3.1 pre L	RC3.1 pre M	RC3.1 pre M	RC3.1 pre H
HPAL >0.04g	EMS 98	D	D	D	D
	RISK-UE	RC3.1 L L	RC3.1 L M	RC3.1 L M	RC3.1 L H
M	EMS 98	C	C	C	C
	RISK-UE	RC3.1 pre L	RC3.1 pre M	RC3.1 pre M	RC3.1 pre H
P	EMS 98	C	C	C	C
	RISK-UE	RC3.1 pre L	RC3.1 pre M	RC3.1 pre M	RC3.1 pre H

Como se mencionó anteriormente, la edad de la edificación permite estimar el número de edificios que pertenecen a cada tipología de vulnerabilidad. Esto se debe al vencimiento de técnicas constructivas antiguas o tradicionales a partir de una cierta fecha, y a la aparición de nuevas tecnologías que se pueden seguir a través de la aparición de normas de obligado cumplimiento.

En la

Tabla 3-6 se presenta un ejemplo una matriz de transferencia, que permite estimar la probabilidad de pertenencia a las tipologías de la metodología RISK-UE, la cual distingue el número de plantas por cada franja de edad de la edificación.

Tabla 3-6. Matriz de transferencia para determinar las equivalencias de las tipologías constructivas de Castilla-La Mancha a los tipos de vulnerabilidad del FEMA en municipios con peligrosidad sísmica > 0.04g. Fuente: Murphy, P.

TIPOLOGÍAS DE VULNERABILIDAD FEMA					
		M1.1	M3.4	RC3.1 PRE CODE	RC3.1 LOW CODE
<1900	1-2	82%	18%	0%	0%
	3-5	82%	18%	0%	0%
	6+	82%	18%	0%	0%
1900-1920	1-2	58%	42%	0%	0%
	3-5	58%	42%	0%	0%
	6+	58%	42%	0%	0%
1921-1940	1-2	28%	72%	0%	0%
	3-5	28%	72%	0%	0%
	6+	28%	72%	0%	0%
:	1-2	8%	82%	10%	0%
	3-5	8%	82%	10%	0%
	6+	8%	82%	10%	0%

3.6.3 Cuantificación de incertidumbres en la asignación de vulnerabilidad

La aplicación de la matriz de transferencia a la base de datos de los edificios se realiza separando los edificios por año de construcción y asignando a los mismos la distribución porcentual de tipologías constructivas existentes en ese rango de tiempo, de acuerdo a su altura.

Esta aleatoriedad en la asignación de tipologías puede conllevar a un grado de incertidumbre alto si los edificios se encuentran localizados geográficamente a gran distancia entre ellos, puesto que el movimiento de entrada puede cambiar notablemente en diferentes puntos de la ciudad, de acuerdo a los tipos de suelo encontrados en la misma.

Atendiendo a este inconveniente, se proponen dos opciones para reducir o cuantificar el error a la hora de aplicar la matriz de transferencia a la base de datos de los edificios:

La primera opción consiste en agrupar los edificios en una unidad de trabajo mayor, como puede ser la manzana o la sección censal, siempre que la misma contenga una sola clase de suelo en su interior, para no perder resolución en cuanto al movimiento de entrada a los edificios. Esta agrupación debe

hacerse manteniendo el número de edificios separado por alturas y años de construcción para aplicar los porcentajes de distribución de tipologías a cada unidad de trabajo. La ventaja de esta agrupación es que la aleatoriedad de la muestra estaría contenida dentro de una unidad de trabajo controlada y con un mismo tipo de suelo, por lo que el movimiento de entrada no variaría en función de la localización del edificio. La desventaja es que esto supondría que cada unidad de trabajo presenta las mismas distribuciones de tipologías en todos los casos, lo cual no suele coincidir con la realidad si la distribución de tipologías está estimada de manera regional. Generalmente, las prácticas constructivas suelen ser parecidas dentro de una misma zona, y variar a lo largo de la ciudad.

La segunda opción consiste en hacer la asignación de tipologías a cada edificio de la base de datos, de acuerdo a su año de construcción y altura. Para esto, se separarán los edificios de todo el núcleo urbano por año de construcción y, en función de sus alturas, se les asignará una tipología de acuerdo a la matriz de transferencia. La desventaja de esta opción es que, en muchos casos, para un mismo año de construcción un edificio puede corresponder a más de una tipología, lo cual conlleva asignar una de las tipologías posibles de manera aleatoria. Para tomar en cuenta el error que conlleva esta incertidumbre, se recomienda implementar en la estimación de la vulnerabilidad un método estocástico de Montecarlo a través de la simulación de un número elevado de muestras de asignación de vulnerabilidad en los edificios. Para cada muestra se calculará el daño, obteniendo un número de edificios con cada grado de daño. Se deberá comprobar la normalidad de los resultados de las muestras mediante un test de Kolgomorov-Smirnov (Kolmogorov, 1933; Stephens, 1992). Si los resultados se ajustan a una distribución normal, se obtendrá finalmente una media y desviación estándar del número de edificios con cada grado de daño.

La Figura 3.16 muestra un esquema del procedimiento para aplicar el método estocástico de Montecarlo a la asignación de vulnerabilidad de un parque inmobiliario para un estudio de riesgo sísmico.

Figura 3.16. Esquema de método estocástico de Montecarlo aplicado a la asignación de vulnerabilidad del parque inmobiliario en un estudio de riesgo sísmico.

3.7 ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO A ESCALA URBANO

Para diseñar de forma efectiva planes de emergencia y definir medidas correctoras que ayuden a controlar y reducir el riesgo existente, es esencial disponer de estimaciones de riesgo sísmico en las poblaciones de la región de interés, sobre las cuales realizar una correcta identificación de los edificios más vulnerables y de aquellas áreas críticas que requerirán mayor atención. Dichas estimaciones pueden ayudar a avanzar, de forma más efectiva, en la mitigación del riesgo y en la creación de planes de emergencia y, de ese modo, reducir las pérdidas que puede ocasionar un fenómeno sísmico, tanto desde el punto de vista físico, como social y económico.

Tras la estimación de la peligrosidad sísmica y definición de los escenarios, y la asignación de tipologías constructivas al parque inmobiliario, se procede al cálculo del riesgo, que se cuantificará por medio de parámetros de daño físico y parámetros de pérdidas humanas y materiales.

Para estimar los daños físicos debidos al movimiento sísmico sobre un conjunto de edificaciones que conforma un núcleo urbano se requieren, esencialmente, tres inputs de cálculo:

- La correcta especificación del movimiento sísmico, incluyendo los posibles efectos de amplificación local del movimiento, representados por medio de espectros de respuesta elástica.
- El tipo de suelo, según la clasificación de suelos propuesta por el NEHRP (2003).
- Las tipologías constructivas de las edificaciones, con la consiguiente asignación de la vulnerabilidad a cada una de ellas.

La metodología para la evaluación del riesgo sísmico a escala urbana en edificios de importancia normal, consiste en estimar los daños estructurales en los edificios ante las sollicitaciones sísmicas correspondientes al escenario definido, según una clasificación que diferencia los grados de daño leve, moderado, extenso y completo, además del nulo. Estos grados de daño tienen una correspondencia con los definidos en la metodología Hazus (2003).

A partir de esta estimación se obtendrán otros indicadores globales del daño, como el daño medio y número de edificios inhabitables (restringiendo esta propuesta a edificios destinados principalmente a vivienda).

Las pérdidas se dividen en pérdidas económicas directas, es decir, los costes de reconstrucción y

reparación de las estructuras dañadas, y en pérdidas humanas, esto es, muertos y heridos debido a edificios colapsados y personas que quedarían sin hogar debido al número de edificios inhabitables.

La Figura 3.17 muestra un esquema con las fases a seguir en la estimación de los parámetros indicadores del riesgo sísmico y que se detallarán en los siguientes subapartados.

Figura 3.17. Esquema de las fases de estimación de parámetros indicadores del riesgo sísmico.

3.7.1 Estimación de daño en edificios

El daño en los edificios es el parámetro más importante a estimar en la evaluación del riesgo sísmico, puesto que repercute directamente en el número de muertes y el impacto económico que pueda ocasionar un terremoto.

Tal como se expuso en el *Capítulo 2 de Estado del arte*, existen diversos métodos para estimar el daño que sufrirán las estructuras ante una acción sísmica determinada. Estos métodos se clasifican generalmente en dos tipos, empíricos y analíticos. Los primeros implican análisis estadísticos mediante la información de la distribución de los daños y el desempeño sísmico de edificios en terremotos pasados. Estas relaciones se calculan a partir de la intensidad macrosísmica del movimiento esperado. El segundo tipo de métodos utiliza expresiones derivadas mecánicamente para describir la capacidad de los edificios para soportar la demanda sísmica y la experiencia de diferentes grados de daño.

En esta propuesta se ha considerado realizar la evaluación del daño físico en los edificios mediante métodos analíticos, puesto que estos constituyen la mejor forma de estimación del mismo cuando el movimiento del suelo se da en términos de aceleraciones espectrales $S_a(T)$. Para caracterizar la respuesta de las estructuras, se empleará un procedimiento analítico estático no lineal conocido como *método de capacidad-demanda* (FEMA, 2005), en el cual la demanda se identifica con la acción sísmica, mediante el espectro de respuesta elástica con un amortiguamiento de 5%, obtenido del cálculo de peligrosidad, en su representación ADRS (del inglés, *Acceleration Displacement Response Spectrum*), es decir, representado en términos de aceleraciones y desplazamientos espectrales. Por otra parte, la capacidad de la estructura viene dada por una curva de capacidad, también conocida como “*curva push-over*”, que refleja el comportamiento de la estructura, desde el régimen lineal hasta el punto de ruptura. Estas curvas relacionan la fuerza cortante aplicada en la base de un edificio con el desplazamiento que ésta produce en el techo del mismo, representando así la capacidad de una estructura a resistir una demanda sísmica. Las curvas también deberán estar dadas en su forma *bilineal* ADSR, lo que se denomina como *espectro de capacidad*.

La intersección del espectro de demanda y el de capacidad conduce a lo que se conoce como punto de desempeño o “*performance point*”, definido como el punto de solicitud de funcionamiento estructural del edificio, el cual corresponde al desplazamiento espectral que se espera que sufra la estructura a causa del movimiento sísmico de entrada o demanda.

Los daños que sufrirá la estructura estarán dados por unas funciones log-normales denominadas *curvas de fragilidad* que proporcionan la probabilidad de alcanzar o exceder cada grado de daño en

función del desplazamiento espectral obtenido para el punto de desempeño. (Figura 3.18)

El procedimiento de cálculo para este proceso se detalla en los siguientes sub-apartados.

Figura 3.18. Esquema de las curvas de capacidad – demanda y fragilidad para estimar el daño en edificaciones

3.7.1.1 Selección de espectros de capacidad y curvas de fragilidad

La curva de capacidad o “curva pushover” aproxima cómo las estructuras se comportan después de exceder su límite elástico. El proceso para calcular la curva de capacidad de una estructura usa una serie de análisis secuenciales elásticos donde el modelo de la estructura es modificado para tomar en cuenta la reducción de resistencia en componentes que han fluido ante las aceleraciones en base; una distribución de cargas laterales es aplicada hasta que componentes adicionales fluyan. Este proceso se repite hasta un límite predeterminado y el mismo requiere severas iteraciones por lo que es imprescindible la utilización de un programa computacional especializado. El comportamiento de la estructura está definido por su geometría y las secciones de cada elemento que la componen, lo que definen su masa y rigidez.

Cuando se lleva a cabo un estudio de riesgo a escala urbana, no siempre se cuenta con el tiempo y la información suficiente para desarrollar curvas de capacidad que representen a todos los edificios que componen el parque inmobiliario de una ciudad, por lo que la mejor alternativa es recurrir a curvas o espectros de capacidad existentes en la literatura que hayan sido desarrolladas para edificaciones en entornos similares y con las mismas características tipológicas.

La elección de los espectros de capacidad que representen el comportamiento de los edificios que conforman el parque mobiliario de la región es fundamental para la estimación del daño físico mediante métodos analíticos en un estudio de riesgo. Sin embargo, existe una grave falta de espectros

de capacidad y curvas fragilidad disponibles de manera abierta para la realización de estudios de riesgo a gran escala.

Debido a esta necesidad, Wald et. al. (2010) y Jaiswal et. al. (2010) han desarrollado una iniciativa para la recolección, recopilación y publicación de este tipo de información alrededor del mundo en una plataforma web, mediante un proyecto llamado WHE-PAGER. Desafortunadamente, este proyecto está aún en desarrollo, y no se encuentran funciones para todas las tipogías constructivas, ni para todos los países.

Entre las metodologías más completas, halladas en la literatura, para la evaluación del riesgo sísmico a escala urbana mediante métodos analíticos destacan las de Hazus-MH (Fema-440, 2005) y Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), las cuales presentan curvas de capacidad y fragilidad desarrolladas para diferentes tipologías estructurales; la primera para edificaciones de los Estados Unidos de América y la segunda para edificaciones europeas. Años más tarde de la publicación de la iniciativa Risk-UE, Lagomarsino y Giovinazzi (2006) (en adelante L&G), miembros integrantes del grupo de trabajo del Proyecto Risk-UE, presentaron un estudio en el cual calibraron y estandarizaron las curvas del Risk-UE para los países europeos.

La correspondencia entre las clasificaciones de vulnerabilidad de los tres proyectos mencionados (Hazus-MH, Risk-UE y la de L&G (2006)) se muestra en la Tabla 3-7, si bien esta correspondencia no es directa, dadas las diferencias que presentan en la clasificación de las tipologías sobre todo en las agrupaciones de mampostería.

En las tres metodologías, los edificios de mampostería y hormigón se clasifican según su altura en *low*, *medium* y *high*. Todas establecen la mampostería de 1-2 pisos como *low*, de 3-5 como *medium* y más de 6 pisos como *high*. En cuanto a los edificios de hormigón, Hazus y L&G establecen como *low* los de 1-3 plantas, *medium* de 4-7 plantas y *high* más de 8 plantas, pero Risk-UE mantiene el mismo número de pisos que en el caso de la mampostería.

Otra diferencia importante encontrada comparando las tres metodologías radica en que Hazus agrupa todos los tipos de mampostería sin reforzar en un solo modelo (URM), y presenta otros dos modelos para la mampostería reforzada (RM1 y RM2), mientras que Risk-UE y L&G dividen la mampostería de acuerdo al material utilizado o elementos estructurales que presentan los edificios (piedra, ladrillo, mampostería sin reforzar con forjados de madera, forjados de hormigón, etc.) y proponen un solo modelo para la mampostería reforzada y confinada (M4 y M7 respectivamente).

Tabla 3-7. Correspondencias entre los modelos de tipologías constructivas de Hazus, Risk-UE y L&G. (Nota: se han resaltados las tipologías empleadas en este estudio y se ha indicado su nomenclatura).

Descripción Hazus	Hazus	RISK-UE	L&G	Descripción Risk-UE y L&G
Madera, Marco ligero (<=5000 sq. ft.) Madera, mayor a 5000 sq. ft.	W1	W	-	Estructuras de madera
Marcos de acero resistentes a momento	S1	S1	-	Marcos de acero resistentes a momento
Marcos de acero diagonal	S2	S2	-	Marcos de acero diagonal
Marcos de acero ligero	S3	-	-	
Marcos de acero con muros cortantes de hormigón vaciado en sitio.	S4	S4	-	Marcos de acero con muros cortantes de hormigón vaciado en sitio.
Marcos de acero con paredes de mampostería sin reforzar	S5	S3	-	Marcos de acero con paredes de mampostería sin reforzar
Forjados de hormigón armado resistentes a momento.	C1	RC1	RC1	Forjados de hormigón armado resistentes a momento.
Muros cortantes de hormigón	C2	RC2	RC2	Muros cortantes de hormigón
Forjados de hormigón con paredes de mampostería sin reforzar	C3	RC31	-	Marcos de Hormigón armado rellenos con paredes de mampostería sin reforzar.
Paredes de hormigón pre-fabricado levantado en sitio.	PC1	RC5	-	Paredes de hormigón pre-fabricado levantado en sitio.
Forjados de concreto prefabricado con muros cortantes de hormigón.	PC2	RC6	-	Forjados de concreto prefabricado con muros cortantes de hormigón.
Muros portantes de mampostería reforzada con diafragmas de madera o de láminas metálicas.	RM1	M4	M7	Mampostería reforzada o confinada
Muros portantes de mampostería reforzada con losas de concreto pre-fabricado.	RM2	M4	M7	Mampostería reforzada o confinada
Muros portantes de mampostería sin reforzar	URM	M2	M2	Adobe
		M31, M32, M33	M5	Mampostería sin reforzar (todos los tipos de bloques)(M2)
		M34	M6	Mampostería sin reforzar (losas de hormigón armado)(M3)
Casas móviles	MH	-	-	
-	-	M11	M1	Escombros de piedra (M1)
-	-	M12	M3	Piedra simple
-	-	M13	M4	Bloques de Piedra
-	-	S5	-	Sistemas de Acero y Hormigón armado.
-	-	RC4	RC3	Sistemas duales de hormigón armado
-	-	M5	-	Mampostería sobre-reforzada

La Figura 3.19 muestra la ductilidad y el periodo de algunas tipologías encontradas en España, según las tres metodologías, calculados de acuerdo a su punto de fluencia y desplazamiento último. Se puede observar que según las curvas de Risk-UE y L&G, las mamposterías presentan ligeramente una mayor ductilidad que los edificios de hormigón armado con código de diseño sísmico bajo, sin embargo, en todos los casos presentan una ductilidad menor que las edificaciones norteamericanas.

En general, y sobretodo para estudios realizados dentro de la Península Ibérica, se proponen las curvas de capacidad de L&G (2006), sobre todo para los casos de tipologías de mampostería porque, además de haber sido especialmente diseñadas para caracterizar el comportamiento de las estructuras existentes en Europa, al igual que las de Risk-UE, presentan un inventario más completo y estandarizado que las del Hazus-MH para estos casos.

Figura 3.19. Ductilidad (arriba) y periodo (abajo) de algunas tipologías de España, según los espectros de capacidad proporcionados por Hazus-MH, Risk-UE y Lagomarsino y Giovinazzi.

3.7.1.2 Punto de desempeño

Una vez obtenidos o seleccionados los espectros de capacidad y las curvas de fragilidad para las diferentes tipologías constructivas del parque inmobiliario, se procede a aplicar el método de capacidad-demanda para estimar el punto de desempeño, y por ende, el desplazamiento espectral que tendría cada edificio ante la excitación sísmica de entrada. Para la obtención del punto de desempeño se proponen dos métodos:

- Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado (I-DCM, del inglés, *Improved Displacement Coefficient Method*)
- Método de ADRS modificado (MADRS, del inglés, *Modified Acceleration Displacement Response Spectrum*)

Estos métodos, ambos propuestos en el reporte FEMA 440 (2005), estiman el desplazamiento máximo que sufriría un edificio debido a un movimiento sísmico en su base, a partir de los espectros de capacidad. El procedimiento a seguir se describe brevemente a continuación.

Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado (I-DCM)

El método del coeficiente de desplazamiento mejorado, I-DCM (FEMA-273 y FEMA-440), consiste en modificar la demanda de desplazamiento del sistema lineal de un grado de libertad (SDOF) equivalente a la estructura multiplicándolo por una serie de coeficientes para estimar el desplazamiento máximo del oscilador no lineal. Este proceso se divide en las siguientes fases:

1. Calcular el periodo efectivo de la estructura (T_c) a partir del punto de fluencia (A_y , D_y) dado en su curva de capacidad:

$$T_c = 2 \pi (D_y/A_y)^{1/2} \quad [3-9]$$

2. Calcular la demanda de aceleración espectral del sistema lineal equivalente de un grado de libertad (S_{a1}) a partir del espectro de respuesta específico (que representa la aceleración, S_a , en función del periodo, T).

3. Calcular la demanda máxima de desplazamiento espectral (S_d)_{cl} del SDOF:

$$(S_d)^{cl} = (T_c)^2 / 4\pi^2 (S_a)^{cl} \quad [3-10]$$

4. Calcular el desplazamiento objetivo, δ_1 , mediante la relación:

$$\delta_1 = C_1 C_2 (S_d)^{cl} \quad [3-11]$$

Donde:

C1 = Factor de modificación para relacionar el desplazamiento máximo esperado de un oscilador no lineal con propiedades histéricas elásticas-perfectamente-plásticas (EPP) con la demanda de desplazamiento máximo del oscilador lineal.

C2 = Factor de modificación para representar el comportamiento histerético, con degradación debido a fallas cortantes y su degradación de rigidez en la respuesta de desplazamiento máximo.

Estos coeficientes pueden calcularse con las relaciones de aproximación siguientes:

$$C_1 = 1 + (R-1)/a (T_c)^2 \quad [3-12]$$

$$C_2 = 1 + 1/800 (R-1/T_c)^2 \quad [3-13]$$

Donde:

R = La tasa de demanda de resistencia elástica con respecto a la capacidad de resistencia calculada:

$$R = (S_a)^{cl}/A_y \quad [3-14]$$

a = La constante de la ecuación y es igual a 130, 90 y 60 para los tipos de suelo B, C y D del NEHRP (2003), respectivamente.

La demanda máxima de desplazamiento espectral obtenido para el oscilador no lineal, δ_1 , se aplica a las funciones de fragilidad y se obtienen las probabilidades de sufrir o exceder los distintos grados de daño para cada tipología estructural.

Método de ADRS modificado (MADRS)

Este método resulta de una modificación al convencional método conocido como Método de Capacidad-Espectro o CSM (del inglés, *Capacity Spectrum Method*) (ATC-40), el cual utiliza tanto el período secante como el periodo lineal efectivo para determinar el desplazamiento máximo (punto de desempeño).

Esta suposición resulta en el desplazamiento máximo que se encuentra de la intersección de la curva de capacidad para la estructura y una curva de demanda para el amortiguamiento efectivo en formato ADRS (Figura 3.20).

Figura 3.20. Espectro de respuesta de aceleración-desplazamiento modificado (MADRS) para uso con periodo secante, T_{sec} . Fuente: FEMA-440

Este método representa una herramienta de visualización al facilitar una comparación gráfica directa de la capacidad y la demanda. El mismo utiliza una linealización equivalente que se basa en una curva de demanda en su forma ADRS modificada (MADRS) que intersecta la curva de capacidad, obteniendo así el desplazamiento máximo de la estructura.

Los parámetros lineales equivalentes óptimos (es decir, el período efectivo T_{eff} y amortiguamiento efectivo β_{eff}) se determinan mediante un análisis estadístico que minimiza, de manera rigurosa, el error entre la respuesta máxima de un sistema inelástico real y un sistema lineal equivalente.

Los valores de amortiguamiento viscoso efectivo (β_{eff}), expresados como porcentaje de amortiguamiento crítico (β_0), en función del valor de ductilidad (μ) para todos los tipos de comportamientos histeréticos y valores de rigidez post-elástica α , se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Para } 1.0 < \mu < 4.0 : \quad \beta_{eff} = 4.9 (\mu - 1)^2 - 1.1 (\mu - 1)^3 + \beta_0 \quad [3-15]$$

$$\text{Para } 4.0 \leq \mu \leq 6.5 : \quad \beta_{eff} = 14 + 0.32 (\mu - 1) + \beta_0 \quad [3-16]$$

$$\text{Para } \mu > 6.5 : \quad \beta_{eff} = 19 + \left[\frac{0.64 (\mu - 1) - 1}{[0.64 (\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 \quad [3-17]$$

Las siguientes ecuaciones para obtener el valor del periodo efectivo se han optimizado para su aplicación a cualquier espectro de capacidad, independientemente del tipo de comportamiento histerético o valor de α :

$$\text{Para } 1.0 < \mu < 4.0 : \quad T_{eff} = \{0.20 (\mu - 1)^2 - 0.038(\mu - 1)^3 + 1\} + T_0 \quad [3-18]$$

$$\text{Para } 4.0 \leq \mu \leq 6.5 : \quad T_{eff} = \{0.28 + 0.13(\mu - 1) + 1\} + T_0 \quad [3-19]$$

$$\text{Para } \mu > 6.5 : \quad T_{eff} = \left\{ 0.89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0.05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 \quad [3-20]$$

El período efectivo, T_{eff} , es generalmente más corto que el período secante, T_{sec} , definido por el punto de la curva de capacidad correspondiente al desplazamiento máximo, d_{max} . La aceleración efectiva, a_{eff} , no es significativa, ya que la aceleración máxima real, a_{max} , debe estar en la curva de capacidad y coincidir con el desplazamiento máximo, d_{max} . La multiplicación de las ordenadas del espectro de demanda ADRS, correspondiente a la amortiguación efectiva β_{eff} , por el factor de modificación da como resultado la curva de demanda ADRS modificada, la cual intersectará la curva de capacidad en el punto de desempeño.

Dado que los valores de aceleración están directamente relacionados con los periodos correspondientes, el factor de modificación se puede calcular como:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_{sec}} \right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}} \right)^2 \quad [3-21]$$

Los procedimientos de linealización equivalentes aplicados en la práctica normalmente requieren el uso de factores de reducción espectral para ajustar un espectro de respuesta inicial al nivel apropiado de amortiguación eficaz, β_{eff} . Estos factores son una función del amortiguamiento efectivo y se denominan *coeficientes de amortiguamiento B* (β_{eff}). Los mismos se utilizan para ajustar las ordenadas de aceleración espectral de la siguiente forma:

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})} \quad [3-22]$$

En el caso del amortiguamiento de cimentación, el valor de amortiguación inicial β_0 para un modelo estructural de zapata flexible se modifica a partir del valor lineal del modelo de zapata rígida, β_i (inicialmente 5%).

De acuerdo a las expresiones propuestas en la ATC-40, el coeficiente de amortiguamiento B se obtiene mediante la siguiente aproximación:

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln \beta_{eff}} \quad [3-23]$$

Para la obtención del punto de desempeño según el método MADRS, FEMA-440 propone tres procedimientos diferentes. En esta metodología se ha optado por utilizar el *Procedimiento B* (conocido como Intersección con MADRS). En este procedimiento, el punto de desempeño se define como la intersección del espectro de capacidad con el ADRS modificado (MADRS). El espectro de demanda MADRS se genera modificando el ADRS para los diferentes valores de amortiguamiento efectivo de forma iterativa hasta encontrar el punto de desempeño.

Los pasos a seguir se enumeran a continuación:

1. Se selecciona el espectro del movimiento del terreno obtenido del escenario definido por el cálculo de peligrosidad, y considerando un amortiguamiento inicial, β_i , (normalmente 5%).
2. Se modifica el espectro seleccionado, según proceda, para la interacción suelo-estructura (SSI), esto implica tanto una reducción potencial de las ordenadas espectrales para la interacción cinemática, como una modificación en el amortiguamiento del sistema desde el valor inicial, β_i a β_0 , para tener en cuenta el amortiguamiento de cimentación. Si se ignora el amortiguamiento de la cimentación, β_0 es igual a β_i .
3. Se convierte el espectro seleccionado, modificado para la interacción suelo-estructura (SSI), cuando sea apropiado, a un formato de espectro de respuesta de aceleración-desplazamiento de acuerdo con los procedimientos establecidos en la ATC-40. Este espectro será la demanda inicial de ADRS.

$$S_d(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} g S_a(T) \quad [3-24]$$

Donde:

- T : periodo
- g : aceleración de la gravedad
- $S_a(T)$: aceleración espectral

4. Se selecciona un punto de desempeño inicial arbitrario dentro del espectro de capacidad de la estructura (aceleración máxima, a_{pi} y desplazamiento, d_{pi}). Este punto inicial se recomienda sea obtenido a través de una aproximación del desplazamiento equidistante, como se muestra en la Figura 3.21.

Figura 3.21. Demanda inicial de ADRS y espectro de capacidad de la estructura. Fuente: FEMA-440

5. Se desarrolla una representación bilineal del espectro de capacidad de la estructura de acuerdo con los procedimientos referidos en el ATC-40. Para ello se define el período inicial, T_0 , el desplazamiento del límite elástico, d_y , y la aceleración del límite elástico de la curva de capacidad de la estructura, a_y . (Figura 3.22)

Figura 3.22. Representación bilineal de la curva de capacidad de la estructura. Fuente: FEMA-440

6. Se calcula el valor de rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , para la representación bilineal de la estructura obtenida en el paso anterior de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} \quad [3-25]$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} \quad [3-26]$$

7. Utilizando los valores calculados para la rigidez post-elástica, α y ductilidad, μ , del paso anterior, se calcula el correspondiente amortiguamiento efectivo, β_{eff} . De igual forma se calcula el correspondiente período efectivo, T_{eff} .

$$\text{Para } 1.0 < \mu < 4.0 : \quad \beta_{eff} = 4.9 (\mu - 1)^2 - 1.1(\mu - 1)^3 + \beta_0 \quad [3-27]$$

$$\text{Para } 4.0 \leq \mu \leq 6.5 : \quad \beta_{eff} = 14 + 0.32(\mu - 1) + \beta_0 \quad [3-28]$$

$$\text{Para } \mu > 6.5 : \quad \beta_{eff} = 19 + \left[\frac{0.64(\mu - 1) - 1}{[0.64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 \quad [3-29]$$

$$\text{Para } 1.0 < \mu < 4.0 : \quad T_{eff} = \{0.20 (\mu - 1)^2 - 0.038(\mu - 1)^3 + 1\} + T_0 \quad [3-30]$$

$$\text{Para } 4.0 \leq \mu \leq 6.5 : \quad T_{eff} = \{0.28 + 0.13(\mu - 1) + 1\} + T_0 \quad [3-31]$$

$$\text{Para } \mu > 6.5 : \quad T_{eff} = \left\{ 0.89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0.05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 \quad [3-32]$$

8. Se ajusta la curva ADRS inicial, con el amortiguamiento efectivo determinado en el paso 7, β_{eff} .

9. Se multiplican las ordenadas de aceleración del ADRS para β_{eff} por el factor de modificación M determinado utilizando el período efectivo calculado T_{eff} para generar el espectro de respuesta aceleración-desplazamiento modificado (MADRS).

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} \right) \quad [3-33]$$

10. Se determina la estimación de la aceleración máxima a_i y desplazamiento máximo d_i como la intersección del MADRS con la curva de capacidad. (Figura 3.23)

Figura 3.23. Determinación del desplazamiento máximo estimado mediante la intersección del espectro de capacidad con MADRS. Fuente: FEMA-440

11. Se compara el desplazamiento máximo estimado d_i con la hipótesis inicial (o anterior) d_{pi} . Si el nuevo desplazamiento máximo está dentro de una tolerancia aceptable, el punto de desempeño corresponde a a_i y d_i . Si no está dentro de una tolerancia aceptable, se repite el proceso de forma iterativa, a partir del Paso 5, usando los valores obtenidos de a_i y d_i , hasta que el valor de desplazamiento máximo estimado esté dentro del rango de tolerancia considerado aceptable.

3.7.2 Clasificación y estimación de grados de daño

Una vez obtenido el punto de desempeño, se emplean las *curvas de fragilidad*, las cuales representan la probabilidad de que una determinada tipología alcance o supere cada uno de los grados de daño predefinidos ante la acción sísmica representativa del escenario de peligrosidad determinado.

Las curvas de fragilidad pueden definirse como “la representación gráfica de la función de distribución acumulada de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural ante una determinada acción sísmica” (Bonnet Díaz, 2003).

Éstas se obtienen utilizando una función log-normal definida por el valor medio del desplazamiento espectral correspondiente al umbral de daño asociado a un estado D_s de daño ($D_s - S_d$) y por una desviación estándar βD_s , mediante la expresión:

$$P[D_s|S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,D_s}} \right) \right] \quad [3-34]$$

Donde:

$P[D_s|S_d]$ es la probabilidad de que la estructura alcance o exceda el estado de daño D_s debido al desplazamiento S_d .

Φ es la función de distribución normal estándar acumulativa.

β es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño D_s . Este valor se ha definido como función de la ductilidad (μ) de la curva de capacidad, con el fin de obtener una dispersión en la distribución del daño equivalente a la resultante del daño observado (Braga et al. 1982).

$$\beta = 0,4 \ln \mu \quad [3-35]$$

$\bar{S}_{d,D_s}$ es el valor medio del desplazamiento espectral al que la estructura alcanza el umbral del estado de daño D_s .

Los valores de β y $\bar{S}_{d,D_s}$ para cada grado de daño están relacionados al desarrollo de las curvas de capacidad de cada tipología, por lo que estos valores se obtendrán de acuerdo a la selección de espectros de capacidad y curvas de fragilidad que se haya realizado para el estudio (Apartado 3.7.1.1.).

La clasificación de grados de daño se ha adoptado de la propuesta por Milutinovic y Trendafiloski (2003) (RISK-UE, W04), correspondientes con las del Hazus (2003), las cuales se estiman sobre daños estructurales y no estructurales en edificios ordinarios (de importancia normal) y en viviendas convencionales. Esta clasificación describe cuatro grados de daño, que son: **leve**, **moderado**, **extensivo** y **completo**, además del daño **nulo**.

La Tabla 3-8 muestra los grados de daños definidos por la metodología Risk-UE, adoptados en esta propuesta metodológica.

Tabla 3-8. Grados de daño, según RISK-UE (Milutinovic&Trendafiloski, 2003).

GRADO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN CUALITATIVA	DAÑO ESTRUCTURAL	DAÑO NO ESTRUCTURAL
0	Nulo	Sin Daños	Sin daños
1	Leve	Insignificante a Ligero	Ligero
2	Moderado	Ligero	Moderado
3	Extenso	Moderado	Severo
4	Completo	Muy Severo a Colapso	Muy Severo a Colapso

Aplicando las probabilidades de daño que ofrecen las curvas de fragilidad (en combinación con las de

capacidad y demanda) y teniendo en cuenta el número de edificios y viviendas de cada unidad de trabajo, se puede estimar el número de edificios y viviendas que tendrán cada grado de daño aplicando la siguiente expresión:

$$N_{dsj}^{Ti} = P_{dsj}^{Ti} \cdot N^{Ti} \quad [3-36]$$

donde:

P_{dsj}^{Ti} es la probabilidad de que las estructuras tipo T_i sufran o superen el grado dsj de daño.

N^{Ti} es el número de edificios tipo T_i que hay en la referencia catastral.

N_{dsj}^{Ti} es el número de edificios de la tipología T_i que se estima que han sufrido el grado dsj de daño.

A partir de estos resultados se pueden calcular otros parámetros indicadores del riesgo sísmico, según el detalle de la información del parque inmobiliario con los que se cuente.

3.7.3 Otro parámetros de riesgo

Ante un evento sísmico, además del daño físico que afecta a los edificios, se pueden obtener otros parámetros que reflejan pérdidas humanas y materiales como: personas afectadas, desde víctimas mortales hasta heridos que requerirán atención médica, edificios inhabitables y personas que quedarían sin hogar, pérdidas económicas asociadas a los costes de reconstrucción y reparación de las edificaciones dañadas, etc.

Todos estos parámetros se pueden estimar de forma aproximada a partir de los resultados de distribución de daños y el porcentaje de edificios colapsados. Para esto se utilizan métodos que implican factores empíricos que han sido obtenidos a través de estudios de pérdidas en terremotos previos, principalmente a nivel europeo.

3.7.3.1 Edificios inhabitables y personas que quedarían sin hogar

Para poder cuantificar cómo afectaría la acción sísmica esperada a la infraestructura de habitabilidad del entorno urbano, otro indicador de riesgo sísmico consiste en estimar el número de edificios que quedarían inhabitables, así como el número de personas que quedarían sin hogar.

Para estimar el número de edificios inhabitables se ha considerado la expresión empírica propuesta por Vacareanu et al. (2004) (RISK-UE, W07, p18), donde se calcula el número de edificios inhabitables por tipología:

$$N_{edif inh} = N_{edif} \cdot PC + N_{edif m} \cdot PE \cdot 0.9 \quad [3-37]$$

donde:

Nedif inh es el número de edificios inhabitables

Nedif es el número de edificios que hay en cada entidad municipal.

PC y **PE** son las probabilidades de daño completo y extensivo, respectivamente.

Esta relación empírica, obtenida a través de estadísticas observadas tras terremotos destructivos anteriores, sostiene que el total de los edificios que presenten un grado de daño completo y el 90% de los que presenten daño extenso se considerarán edificios inhabitables. Vacareanu (2004) sostiene que después de un evento sísmico con fuerte daños en el parque inmobiliario, se ha observado que la mayor parte de los edificios con daño extenso quedan inhabitables, debido a que sus ocupantes se resisten a habitarlos al observar daños estructurales considerables en la estructura.

Para estimar el número de personas que quedarían sin hogar, se realiza una multiplicación directa del número de habitantes por edificios por el número de edificios que resultan inhabitables.

$$Hab\ SH = Nedif\ inh \cdot hab/edif \quad [3-38]$$

donde:

Hab SH habitantes que quedarían sin hogar

Nedif inh es el número de edificios inhabitables

Hab/edif es el número de habitantes por edificio o vivienda.

3.7.3.2 Número de edificios que alcanzarán el colapso

El número de edificios que alcanzarán el colapso es un dato de gran interés en la gestión de la emergencia y para estimar otros parámetros de riesgo, como por ejemplo las pérdidas humanas.

De acuerdo a la clasificación de grados de daños adoptadas según las metodologías Hazus y Risk-UE, se requiere obtener este valor a partir del número de edificios con daño completo.

Puesto que el daño completo corresponde a edificios con daño estructural muy severo y no sólo a los que colapsarán, existen diversas propuestas basadas en relaciones empíricas para estimar el porcentaje de edificios de grado completo que resultarán en colapso.

En el caso de los edificios de mampostería, se seguirá la expresión propuesta por Lagomarsino & Giovinazzi (2006) (autores de los espectros de capacidad propuestos para las edificaciones de

mampostería):

$$P_{S4} = P_5 + P_4 \quad [3-39]$$

donde P_{S4} representa el porcentaje de edificios con grado de daño completo, P_4 el porcentaje de edificios que sufrirán daño fuerte y P_5 el porcentaje de edificios colapsados.

El porcentaje de edificios que colapsarán, se calcula mediante la ecuación:

$$P_5 = 0.09 \sinh(0.6\mu_{DS})P_{S4} \quad [3-40]$$

$$\text{donde } \mu_{DS} = \sum_{k=1}^4 kP_{Sk}$$

En el caso de edificios de Hormigón armado, se recomienda estimar el número de edificios colapsados siguiendo la metodología propuesta por Hazus (autores de los espectros de capacidad propuestos para Hormigón armado). Siendo este igual al 15% de los edificios con daño completo.

3.7.3.3 Índice de daño medio

El daño medio (D_m) es un parámetro de medida del daño en edificios que permite establecer con un índice único el daño que sufrirán la mayor parte de los edificios del parque inmobiliario estudiado.

Este parámetro toma valores que varían entre 0 - 4, siendo 0 el equivalente a daño nulo y 4 el equivalente a daño completo. La expresión general utilizada es:

$$D_m = \sum_{j=0}^4 P_{ij} \times D_j \quad [3-41]$$

Para asemejar este parámetro a la escala de daño propuesta, este será igual a:

$$D_m = 0 \cdot D_{nulo} + 1 \cdot D_{ligero} + 2 \cdot D_{moderado} + 3 \cdot D_{extenso} + 4 \cdot D_{completo} \quad [3-42]$$

Este parámetro tiene intervalos de variación para cada estado de daño. Estos intervalos se muestran en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Intervalos de variación del índice de daño medio (D_m) para cada grado de daño.

GRADO DE DAÑO	VALOR DE DM
Leve	$0.5 \leq D_m \leq 1.5$
Moderado	$1.5 \leq D_m \leq 2.5$
Extenso	$2.5 \leq D_m \leq 3.5$
Completo	$3.5 \leq D_m \leq 4.0$

3.7.3.4 Pérdidas humanas

Según esta metodología, las pérdidas humanas se refieren el número de víctimas esperadas en función del colapso de edificios que resulta de la estimación del riesgo. Este parámetro del riesgo se estimará a partir de del número de viviendas que resultarían colapsadas, resultante de la estimación del daño físico en los edificios y del número de habitantes por vivienda o densidad de población en la unidad de trabajo determinada.

Para esta estimación, se propone la aplicación del modelo empírico de Coburn y Spence (2002). Estos autores, establecieron una serie de coeficientes ($M1$ a $M4$) que reflejan los factores de los que depende el número final de muertos y heridos tras un terremoto. Esta metodología no supone que todas las personas que pueden encontrarse en un edificio colapsado mueren, sino que incluye una serie de factores implicados como la hora del día a la que suceda el sismo o la atención médica que reciben los heridos, relacionados mediante la siguiente la expresión:

$$K_i = C \times M1 \times M2 \times M3 \times (M4 + M5 \times (1 - M4)) \quad [3-43]$$

Donde:

Ki = número de víctimas por tipología constructiva.

C = número total de edificios colapsados de tipología i.

M1. Tasa de ocupación. Número medio de personas por vivienda.

M2. % de personas que se encuentran en su vivienda en la hora de ocurrencia del terremoto. Para este factor, los autores proponen las curvas empíricas mostradas en la Figura 3.24.

Figura 3.24. Ocupación de los edificios en función de la hora del día. (De Coburn y Spence, 2002).

M3. % de personas atrapadas por colapso. Este factor refleja el hecho de que no todas las personas que se encuentran en su vivienda cuando el edificio colapsa quedan atrapadas, debido a que el edificio puede no colapsar completamente o inmediatamente, o a que las personas puedan salir por sus propios medios o con ayuda de otras cercanas que hayan quedado ilesas. La Tabla 3-10 muestra estos porcentajes estimados en función del tipo de edificio y de la intensidad macrosísmica.

Tabla 3-10. Porcentaje medio de personas atrapadas por colapso, dependiendo de la intensidad del movimiento.

TIPO DE EDIFICIO	INTENSIDAD MACROSÍSMICA			
	VII	VIII	IX	X
Edif. Mampostería (hasta 3 plantas)				
No sismorresistentes	5	30	60	70
Sismorresistentes	-	10	30	60
Estructuras de hormigón armado				
Sismo próximo – corto periodo			70	
Sismo lejano – largo periodo			30	

La intensidad macrosísmica MSK-64, se puede estimar a partir de ecuaciones de correlación que relacionan la intensidad con las aceleraciones PGA y aceleración pico efectiva EPA del movimiento (Margotini et al., 1987, Osaka, 1991, RISMUR, 2006).

Otra manera de estimar la intensidad es mediante la distribución de daños obtenida y la correspondencia entre los grados de daño establecidos para la estimación de daños en edificios con los de la escala de intensidad MSK-64. La definición de los grados de intensidad macrosísmica en dicha escala se muestran en la Tabla 3-12.

M4. % de víctimas por colapso. Un porcentaje de las personas que quedan atrapadas en un edificio que alcanza el grado de daño completo muere y el resto sufren heridas de diferente gravedad, desde daños leves hasta muy graves. Esta distribución se muestra en la Tabla 3-11 y entra en el modelo de estimación de víctimas por medio del término M4.

Tabla 3-11. Porcentaje de víctimas por colapso en diferentes tipologías con distinto tipo de daño físico.

CATEGORÍA POR TIPO DE HERIDOS	MAMPOSTERÍA NO REFORZADA	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO
Muertos o insalvables	10	20	40
En estado de urgencia	20	30	10
Heridos que requieren hospitalización	30	30	40
Heridos leves	40	20	10

Tabla 3-12. Grado de intensidad macrosísmica y su correspondiente descripción, según la escala MSK.

INTENSIDAD	DESCRIPCIÓN
I	Terremoto imperceptible. Sólo son registrados por los sismógrafos.
II	Terremotos escasamente perceptibles (muy leves).
III	Terremoto débil, observado sólo parcialmente. Las personas más sensibles lo sienten.
IV	Terremoto sentido considerablemente. El evento es sentido por muchas personas.
V	Fuerte. Despertamiento. Sentido por todas las personas en el interior de edificios y por muchas fuera. Muchas personas durmiendo se despiertan. Hay algunos daños en edificios menos sólidos.
VI	Daños ligeros. Las personas se asustan y corren hacia afuera de las edificaciones. Hay daños en estructuras medias.
VII	Daños en edificios. Se asustan la mayoría de las personas. Hay daños sobre las estructuras. En el diseño y construcción debe ser tomada en cuenta la carga de sismo.
VIII	Fuertes daños en los edificios. Destrucción de edificios. Alarma general. La carga de sismo comienza a ser crítica en el diseño.
IX	Daño general de edificios. Pánico general. Muchos edificios se caen. La carga de sismo es la más importante en el diseño. Hay que tomar medidas especiales antisísmicas.
X	Destrucción general de edificios. Grandes grietas en el suelo.
XI	Catástrofe. Ocurren serios daños, destrucción total. Considerables deformaciones del suelo.
XII	Cambio de relieve. Se destruyen prácticamente todas las construcciones. Cambios radicales en la superficie del terreno.

M5. % de víctimas post-evento. Las personas atrapadas entre los escombros de los edificios colapsados pueden ser rescatadas y atendidas, evitando así peores consecuencias, algo que depende de la efectividad de la acción post-evento. En la Tabla 3-13 se muestra el porcentaje de personas atrapadas en edificios colapsados que se estima morirán a posteriori en función de la capacidad de acción tras el terremoto.

Tabla 3-13. Porcentaje de personas atrapadas entre los escombros que mueren en función de la respuesta post-evento.

TIPO	SITUACIÓN	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO
1	Comunidad incapacitada	95	-
2	Comunidad capaz de organizar actividades de rescate	60	90
3	Comunidad con escuadrones de emergencia después de 12 horas	50	80
4	Comunidad con escuadrones de emergencia SAR después de 36 horas	45	70

3.7.3.5 Estimación de costes

El último parámetro del riesgo sísmico a escala urbana a estimar consiste en las pérdidas económicas. El grado de detalle de esta estimación va a depender de la información de costes con que se cuente acerca de las edificaciones y viviendas. En caso de contar con el valor de construcción de una vivienda, la metodología se limitará solo a las pérdidas económicas directas, es decir, costes de reconstrucción y reparación de las estructuras dañadas (sin tener en cuenta el valor de los contenidos).

Esta metodología está basada en los diferentes grados de daños estructural esperado en los edificios, por lo tanto, no incluye los costes que conlleven los servicios sociales después del terremoto, ni costes para la reparación y rehabilitación de infraestructuras viales, sanitarias, educativas, deportivas, patrimonio cultural, ayudas a comercios, etc.

Para llevar a cabo este cálculo es necesario obtener previamente el valor catastral medio correspondiente al sitio de estudio. Para este fin, conviene acudir a la información disponible en las Direcciones Generales de Catastro o informes de evaluación del mercado inmobiliario, donde se defina el valor catastral como el valor de la construcción completa: suelo, materiales, mano de obra, promoción.

Con el valor catastral y la superficie construida de las viviendas, se obtiene el precio de construir el metro cuadrado:

$$\text{Precio unitario [€/m}^2\text{]} = \text{Valor catastral} / \text{superficie promedio de una vivienda}$$

Aplicando la siguiente expresión se calculan los costes de reparación de cada tipología:

$$CR = ST \cdot PC \cdot PU \quad [3-44]$$

Donde:

CR es el coste de reconstrucción.

ST es la superficie total construida.

PC es la probabilidad de daño completo.

PU es el precio unitario.

Para estimar los costes de reparación de las edificaciones que resulten con daños extensos, moderados y leves, en los casos en que no se cuente con esta información a través de estadísticas de la construcción o informes anuales de inmuebles de la región, se puede adoptar la propuesta de

Vacareanu et al. (2004) de estimar los mismos como un porcentaje del coste de reconstrucción. Estos porcentajes, observados empíricamente, son:

- Coste de reparar daño leve: el 2% del CR
- Coste de reparar daño moderado: el 10% del CR
- Coste de reparar daño extenso: el 50% del CR

Finalmente, todos los resultados de estimadores del riesgo sísmico obtenidos deberán ser integrados en una herramienta SIG para la elaboración de mapas representativos del riesgo, que sirvan de base para analizar resultados y planificar las medidas de mitigación pertinentes, planes emergencias correspondientes y planes de ordenamiento territorial.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN: ESCENARIOS DE MOVIMIENTO FUERTE

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología de riesgo sísmico a escala urbana, expuesta en el *Capítulo 3*, al caso del núcleo urbano de la ciudad de Lorca.

En primer lugar, se realizará una adecuada descripción de la zona de aplicación, estableciendo el marco geodinámico de la Región de Murcia, y en concreto, las características sismotectónicas de la zona de influencia definida para la ciudad de Lorca.

El estudio de la peligrosidad se realizará con un enfoque probabilista-determinista. Se comienza estimando la peligrosidad sísmica siguiendo la línea metodológica PSHA, propuesta en los *Apartados 3.3 y 3.4 del Capítulo 3*, y caracterizando la acción sísmica que servirá como input para el posterior cálculo del riesgo.

Se presentarán los datos de partida para el estudio, que incluyen la confección del catálogo sísmico y del catálogo de fallas activas consideradas, así como la selección de la zonificación para los dos métodos de modelización de la fuente sísmica que se han aplicarán para el cálculo de la peligrosidad. Estos son: el método clásico zonificado (MCZ) y el método híbrido de zonas y fallas (MHZF).

Posteriormente, se exponen los resultados del análisis de residuos realizado para la selección de los modelos de movimiento fuerte o ecuaciones de predicción (GMPEs), a partir de la base de datos acelerométrica de España del Instituto Geográfico Nacional *IGN*, y se justificará la elección de los GMPEs a partir de los resultados obtenidos.

La cuantificación del efecto local será establecida a partir del mapa de velocidades V_{s30} , determinado de los valores y modelo de estructura V_s obtenido con las técnicas de SPAC y MASW aplicadas en la ciudad de Lorca y publicadas por Navarro et al. (2013).

Seguidamente, todos estos parámetros y modelos son incorporados de manera ponderada en un árbol lógico, para la estimación de la peligrosidad sísmica, tanto en el emplazamiento genérico en roca, como incluyendo el efecto local de los suelos presentes en la ciudad de Lorca. Se detallarán las especificaciones de cálculo consideradas para esta estimación.

Los resultados del cálculo de la peligrosidad serán representados a través de mapas de aceleraciones esperadas en PGA, $S_a(0.1s)$, $S_a(0.2s)$ y $S_a(1s)$ y de espectros de respuesta UHS contruidos punto a

punto para todas las ordenadas espectrales calculadas hasta un periodo de 2 segundos. Los UHS se obtienen para un periodo de retorno de 475 años (10% de excedencia en 50 años) y 975 años (10% en 100 años), que se eligen como referencia por ser los manejados habitualmente en normativas para edificaciones convencionales (475 años) y de especial importancia (975 años). A su vez, estos periodos de retorno suelen asociarse al sismo frecuente y al sismo extremo, respectivamente.

A partir de los resultados del cálculo de peligrosidad se efectuará la desagregación para obtener los sismos con mayor contribución a esos movimientos o *sismos de control*, que definen los escenarios sísmicos dominantes, que serán caracterizados de manera determinista para su correspondiente estimación del riesgo sísmico. La caracterización de estos escenarios será expuesta en los capítulos posteriores de esta tesis.

4.2 ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD Y TECTÓNICA DE LA ZONA

La ciudad de Lorca se encuentra ubicada en la Región de Murcia, al sudeste de España, considerada una zona de sismicidad moderada con predominio de fallas “lentas” (producen sismos con periodos de recurrencia muy largos). Diversos estudios sobre tectónica local y paleosismicidad han sido desarrollados en esta zona, lo que permite que se disponga de información relevante sobre las fallas activas de la región.

Se ha definido como zona de influencia un radio de 450km alrededor de la ciudad de Lorca, teniendo en cuenta la contribución de posibles zonas o fuentes cuya sismicidad puede tener contribución en la peligrosidad del sitio. Ésta zona abarca entonces el área comprendida entre las latitudes 34.5 N a 41 N y las longitudes 2.5 E a 6 W.

La zona de aplicación se encuentra contenida dentro de la denominada subplaca Ibérica (Srivastava et al. 1990). Tal como se mencionó en el *marco geodinámico de España*, expuesto en el *Capítulo 3*, el sureste de la Península Ibérica está en una zona de convergencia continental entre la placa africana y la placa euroasiática, lo que ha producido una compresión tectónica regional de dirección NNW-SSE que culminó con la colisión de la Zona Interna y la Zona Externa Bética durante el Burdigaliense medio (Zeck et al., 1989). La inversión y deformación del margen pasivo (Zona Externa Bética) han producido fallas regionales ENE-WSW de salto en dirección que controlan la estructura y la tasa de sedimentación de las principales cuencas sedimentarias del sur de España (Sanz de Galdeano et al., 1995). (Figura 4.1).

Una de las cuencas sedimentarias es la del río Guadalentín , quedando delimitada al norte por el Sistema de Fallas de desgarre de Alhama de Murcia (García-Mayordomo, 2005). La actividad neotectónica de la región determina la evolución geomorfológica y la geometría y distribución espacial del registro sedimentario Plio-Cuaternario (Silva et al., 1992).

Figura 4.1. Mapa de región de estudio, cordillera Bética, con la batimetría, el límite entre placas (USGS) y las fallas activas (QAFI).

La gran mayoría de los sismos ocurridos en esta zona son de foco superficial, con profundidades menores a 30 km, asociados a fallamientos de corteza. A grandes rasgos, el mecanismo focal de los terremotos superficiales de la zona muestra fallas normales en el sur de España y mar de Alborán (Bufo y Udías 2003), destacando el límite oriental del dominio de Alborán, donde predominan los mecanismos de desgarre con cierta componente inversa en algunos casos. Ello se debe a la zona de cizalla (Béticas-Alborán) que, siguiendo la costa sureste, cruza el mar hasta el margen de Marruecos. Ésta zona tiene una intensa actividad sísmica (Stich et al., 2010) e incluye las fallas de Carboneras, Alhama de Murcia, Carrascoy y Bajo Segura. La ciudad de Lorca se encuentra ubicada encima de la intersección de dos segmentos del sistema de fallas de Alhama de Murcia: el segmento Goñar-Lorca y el segmento Lorca-Totana.

Atendiendo a la sismicidad de la región, la época pre-instrumental tiene una importancia fundamental, puesto que en la zona de influencia de la ciudad han ocurrido terremotos muy destructivos (Martínez Solares 2003). Entre ellos hay que destacar los ocurridos en Torre Vieja 1829 y Arenas del Rey 1884, este último considerado como el último terremoto altamente destructor en España (IGN, 1980),

causando más de 750 víctimas mortales. De los sismos ocurridos en la zona en época instrumental, cabe mencionar el de Cehegín en 1948, Mula en 1999, Bullas en 2002, La Paca en 2005 y el propio terremoto de Lorca de 2011, en el cual se centran parte de los objetivos de este estudio.

Figura 4.2. Mapa de sismos con intensidad mayor o igual que VIII de la época pre-instrumental (antes de 1923) y sismos con magnitud mayor a Mw a 5 (después de 1923), ocurridos en la época instrumental, en la zona de influencia de la ciudad de Lorca.

4.2.1 Fallas activas en la zona de influencia de Lorca

Para elaborar el catálogo de fallas activas, se ha partido de la base de datos de fallas activas del Cuaternario desarrollada para la Región de Murcia, QAFIMUR-2013 (Martín-Banda y García-Mayordomo, 2013) y ésta se ha comparado y completado con la base de datos actualizada del QAFIV.3 (2015).

La base de datos del QAFIMUR-2013 contiene 73 fallas. Sin embargo, algunas de estas fallas carecen de información necesaria para poder ser modelizadas de forma independiente, en concreto no contienen el valor de la tasa de deslizamiento anual. Por este motivo, dichas fallas no podrán ser modelizadas individualmente en el cálculo de peligrosidad (Tabla 4-1). Sin embargo, sus magnitudes máximas (calculadas a partir de su geometría) sí se han tenido en cuenta a la hora de establecer las

magnitudes máximas e incertidumbres de las zonas sismogénicas que las contienen para el cálculo de peligrosidad según el método zonificado (MCZ).

Las regiones sísmicas que contienen las fallas seleccionadas dentro de la zona de influencia de Lorca también contienen otras fallas que han quedado fuera del rango geográfico de la base de datos QAFIMUR y que pueden tener repercusión en el potencial sísmico que afecta a la región. Por ese motivo, la base de datos final de fallas se ha completado con fallas de la base de datos QAFIv.3 (Figura 4.3-a). Estas fallas se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-1. Fallas o segmentos que no tienen la información suficiente para poder ser modelizadas de modo individual en el cálculo de peligrosidad. L: longitud de la traza de la falla o segmento, W: ancho, Zmin y Zmax: profundidad máxima y mínima. SR: Slip rate (tasa de deslizamiento).

ID	Nombre	L (km)	W (km)	Zmin (km)	Zmax (km)	SR (mm/año)
ES633	Torremendo	11.8	22.0	1.0	12.0	0.0
ES623	Alcoy-Cocentaina	6.0	15.5	0.0	15.0	0.0
ES758	West of Carche	5.9	7.8	0.0	5.0	0.0
ES775	Segura Medio Fault System (2/2)	14.0	11.0	0.0	11.0	0.0
ES774	Segura Medio Fault System (1/2)	13.8	15.5	0.0	11.0	0.0
ES767	El Sabinar	5.7	5.0	0.0	5.0	0.0
ES768	Archivel	12.4	5.0	0.0	5.0	0.0
ES770	Tarragoya	22.5	15.0	0.0	15.0	0.0
ES772	Loma de Yeguas – Cañada Lengua	17.4	11.0	0.0	11.0	0.0
ES773	La Encarnación	6.7	5.8	0.0	5.0	0.0
ES757	Lomas de Cliler - Avilés Sur	8.0	7.1	0.0	5.0	0.0
ES747	Llano de las Cabras	7.0	7.1	0.0	5.0	0.0
ES764	West of Pericay - Gigantes	3.8	5.0	0.0	5.0	0.0
ES771	Caravaca - Singla	8.6	5.0	0.0	5.0	0.0
ME024	La Marina	38.8	9.2	0.0	8.0	0.0
ES759	Las Lomas System	6.5	5.1	0.0	5.0	0.0
ES749	Hinojar	7.2	11.3	0.0	8.0	0.0
ES755	Rebate	10.8	9.7	0.0	8.0	0.0
ES754	Corvera	20.5	13.9	0.0	8.0	0.0
ES752	Sucina - El Estacio	24.9	8.0	0.0	8.0	0.0
ES744	Cartagena-2	21.0	9.2	0.0	8.0	0.0
ES751	Falla del Chopillo	10.5	17.1	0.0	11.0	0.0

Tabla 4-2. Fallas incluidas en la base de datos final de cálculo provenientes de la base de datos QAFI, que no han sido inicialmente incluidas en QAFIMUR. Azim., Buz. Y Dir.: azimuth, buzamiento y dirección de la falla (en grados), respectivamente, L: longitud de la traza de la falla o segmento (en km), W: ancho de la falla (en km), Zmin y Zmax: profundidad máxima y mínima (en km). SR: Slip rate (tasa de deslizamiento) en (mm/año).

ID	FaultName	Acim.	Buz.	Dir.	L	W	Zmin	Zmax	SR
ES630	Carboneras (1/2)	48	90	10	110.5	11.0	0.0	11.0	1.10
ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	65	90	30	34.8	15.0	0.0	15.0	0.10
ES635	Polopos fault zone (1/2)	80	40	80	17.0	15.6	0.0	10.0	0.25
ES636	Polopos fault zone (2/2)	95	80	135	13.0	10.2	0.0	10.0	0.24
ME009	Southwest of Columbretas Basin	335	60	-90	10.0	15.6	1.5	15.0	0.02
ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	188	60	-90	16.0	15.6	1.5	15.0	0.02
ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	197	60	-90	48.0	15.6	1.5	15.0	0.02
ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	331	60	-90	25.0	15.6	1.5	15.0	0.04
ME005	Cabo de Cullera Western Fault	327	60	-90	28.0	15.6	1.5	15.0	0.04

Finalmente, el número total de fallas y segmentos de fallas que se considerarán como fuentes independientes según el método MHZF en el cálculo de peligrosidad es de 55, de las cuales 46 pertenecen a la base de datos QAFIMUR y 9 a la base de datos QAFIv.3. El listado completo se presenta en la Tabla 4-3, junto a los parámetros característicos de su geometría y tasa de deslizamiento. En la Figura 4.3-b se muestra un mapa con la localización de las correspondientes trazas de falla.

Tabla 4-3. Fallas y segmentos de falla incluidos en el cálculo de la peligrosidad sísmica. Azim., Buz. Y Dir.: azimuth, buzamiento y dirección de la falla (en grados), respectivamente, L: longitud de la traza de la falla o segmento (en km), W: ancho de la falla (en km), Zmin y Zmax: profundidad máxima y mínima (en km). SR: Slip rate (tasa de deslizamiento) en (mm/año).

ID	Nombre	Az.	Buz	Dir.	L (km)	W (Km)	Zmin	Zmax	SR
ES728	Socovos (1/2)	295	85	180	53.0	15.1	0.0	15.0	0.04
ES730	Pozohondo	113	75	-120	25.0	11.4	0.0	11.0	0.10
ES765	Rambla del Puerto	036	85	-90	3.0	5.0	0.0	5.0	0.01
ES766	Sur de Revolcadores	160	90	-90	5.2	5.0	0.0	5.0	0.02
ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	65	90	0	34.8	15.0	0.0	15.0	0.05
ES622	Muro de Alcoy (o de Mariola)	335	60	-90	6.0	17.3	0.0	15.0	0.20
ES624	Benasau	300	60	-90	5.0	17.3	0.0	15.0	0.20
ES634	Jumilla (Sector Valencia) (1/2)	060	90		40.0	15.0	0.0	15.0	0.05
ME005	Cabo de Cullera Western Fault	327	60	-90	28.0	15.6	1.5	15.0	0.03
ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	331	60	-90	25.0	15.6	1.5	15.0	0.03
ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	197	60	-90	48.0	15.6	1.5	15.0	0.02
ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	188	60	-90	16.0	15.6	1.5	15.0	0.02
ME009	Southwest of Columbretas Basin	335	60	-90	10.0	15.6	1.5	15.0	0.02
ES601	Crevillente (Sector Murcia) (1/3)	252	90	0	30.0	15.0	0.0	15.0	0.10
ES602	Crevillente (Sector Murcia) (2/3)	243	90	0	43.7	15.0	0.0	15.0	0.10
ES603	Crevillente (Sector Murcia) (3/3)	253	90	0	17.8	15.0	0.0	15.0	0.10
ES604	Crevillente (Sector Alicante) (1/2)	250	90	0	30.0	15.0	0.0	15.0	0.07
ES605	Jumilla (Sector Murcia) (1/3)	053	90	0	35.0	11.0	0.0	11.0	0.01
ES606	Jumilla (Sector Murcia) (2/3)	057	90	0	30.0	11.0	0.0	11.0	0.01
ES607	Jumilla (Sector Murcia) (3/3)	051	90	0	15.0	11.0	0.0	11.0	0.05
ES626	Alhama de Murcia (1/4)	215	70	20	30.0	12.8	0.0	12.0	0.50
ES627	Alhama de Murcia (2/4)	238	70	18	20.0	12.8	0.0	12.0	0.30
ES628	Alhama de Murcia (3/4)	0	70	0	12.0	12.8	0.0	12.0	0.07
ES629	Alhama de Murcia (4/4)	0	70	0	25.0	12.8	0.0	12.0	0.07
ES631	Amarguillo	020	90	90	12.0	8.0	0.0	8.0	0.10
ES632	Las Viñas	285	80	70	3.5	5.1	0.0	5.0	0.40
ES684	Botardo-Alfahuara	112	85	135	25.0	11.0	0.0	11.0	0.04
ES716	Albox	255	50	110	10.0	13.1	0.0	10.0	0.02
ES729	Socovos (2/2)	272	75	135	36.0	15.5	0.0	15.0	0.20
ES769	La Junquera-Mancheño	325	85	-135	16.2	5.0	0.0	5.0	0.28
ES609	Palomares (1/2)	014	90	0	45.0	8.0	0.0	8.0	0.04
ES611	Corredor de Las Alpujarras (Sector Almería)	84	90	0	50.0	12.0	0.0	12.0	0.05
ES625	Alhamilla Sur	67	80	0	25.0	8.1	0.0	8.0	0.05
ES630	Carboneras (1/2)	48	90	10	110.5	11.0	0.0	11.0	1.10
ES635	Polopos fault zone (1/2)	85	75	0	13.0	5.2	5.0	10.0	0.05
ES636	Polopos fault zone (2/2)	95	80	0	12.0	5.1	5.0	10.0	0.07
ES610	Palomares (2/2)	037	90	0	25.0	8.0	0.0	8.0	0.04

ES612	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (1/3)	104	90	0	15.0	8.0	0.0	8.0	0.05
ES613	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (2/3)	102	90	0	30.0	8.0	0.0	8.0	0.05
ES614	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (3/3)	079	90	0	50.0	8.0	0.0	8.0	0.05
ES615	Carrascoy	056	70	20	32.0	12.8	0.0	12.0	0.54
ES616	Torre vieja	116	80	135	22.0	12.2	0.0	12.0	0.11
ES617	San Miguel de Salinas	125	80	135	30.5	12.2	0.0	12.0	0.43
ES618	Bajo Segura (1/3)	083	60	90	10.0	12.7	1.0	12.0	0.40
ES619	Bajo Segura (2/3)	084	60	90	8.0	12.7	1.0	12.0	0.27
ES620	Bajo Segura (3/3)	077	60	90	9.0	12.7	1.0	12.0	0.20
ES743	West Cabezo Gordo (Murcia - Mar Menor)	140	60	-90	30.9	9.2	0.0	8.0	0.09
ES745	El Cantal	060	80	-45	8.9	8.1	0.0	8.0	0.07
ES746	Garrovilla	020	90	-90	4.0	5.0	0.0	5.0	0.05
ES750	La Puebla	271	60	-90	30.0	9.2	0.0	8.0	0.08
ES756	La Galera	102	80	-135	9.0	8.1	0.0	8.0	0.07
ES760	Los Tollos	037	80	15	15.0	8.1	0.0	8.0	0.16
ES761	Falla de Águilas	250	90	-45	15.2	5.0	0.0	5.0	0.06
ME021	Bajo Segura Offshore	082	60	90	29.3	12.7	1.0	12.0	0.20
ME023	Santa Pola	089	60	90	36.2	9.2	0.0	8.0	0.05

Por otra parte, también se realizará un cálculo incluyendo nuevas tasas de deslizamiento (*slip rates*) en algunas fallas, estimadas con técnicas geodésicas en los últimos años (Echeverría, 2015). Las fallas con estas tasas de deslizamiento se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Tasas de deslizamiento (mm/año) y profundidades de bloqueo (en km) obtenidas a partir de técnicas geodésicas.

ID	Nombre	SR (mm/año)	Zmin (km)	Zmax (km)
ES609	Palomares (1/2)	0.15	0.0	11.0
ES610	Palomares (2/2)	0.15	0.0	11.0
ES626	Alhama de Murcia (1/4)	1.35	0.0	12.0
ES627	Alhama de Murcia (2/4)	1.35	0.0	12.0
ES628	Alhama de Murcia (3/4)	1.0	0.0	12.0
ES629	Alhama de Murcia (4/4)	0.2	0.0	12.0
ES630	Carboneras (1/2)	1.4	0.0	11.0

Figura 4.3. Arriba: a) Mapa con la ubicación de las trazas de fallas de la base de datos del QAFIMUR (2013) y QAFiv.3 (2015) dentro de la zona de influencia de la ciudad de Lorca. Abajo: b) Mapa con las trazas de fallas consideradas finalmente para el cálculo de peligrosidad.

4.2.1 Zonificaciones seleccionadas según el método

Tal como se ha expuesto en el *Apartado 3.2.* del Capítulo que describe la metodología aplicada en esta tesis, la zonificación más reciente e idónea para estudios de peligrosidad en España es la publicada por García-Mayordomo (2012) (*GM12*), por lo que se ha seleccionado la misma para su aplicación según el método zonificado MCZ.

Sin embargo, esta zonificación ha sido diseñada para modelizar las fuentes como zonas sismogénicas y no como fallas independientes, por lo que para la aplicación del método MHZF se utilizará la versión anterior de esta zonificación, publicada dos años antes por el mismo autor, García-Mayordomo (2010) (*GM10*), especialmente para estos casos.

La Figura 4.4 y Figura 4.5 muestran las zonas sismogénicas en ambas zonificaciones, *GM10* y *GM12*, respectivamente, popuestas para el sudeste de España.

Figura 4.4. Zonas identificadas por García-Mayordomo (2010), en el entorno de la zona de influencia de Lorca.

Figura 4.5. Zonas identificadas por García-Mayordomo (2012), en el entorno de la zona de influencia de Lorca.

Finalmente, para el cálculo por el método zonificado se han seleccionado 18 zonas sismogénicas de la zonificación *GM12*, y para el método híbrido de zonas y fallas se han considerado 17 zonas sismogénicas de la zonificación *GM10* que intersectan la zonas de influencia de la ciudad de Lorca.

A continuación se presenta una breve descripción de las zonas que se incluyen en el cálculo de la peligrosidad.

La zona 55, incluida en la zonificación más reciente de García-Mayordomo (2012), está definida para abarcar la zona de deformación controlada por la actividad de las fallas de Carboneras, Palomares, Alhama de Murcia, Carrascoy y Bajo Segura. Éstas son las grandes fallas de desgarre que caracterizan tanto la morfología como la distribución de la sismicidad de las Béticas Orientales.

Las zonas 34, 35, 36, 37, 38 y 39 comprenden los sectores más rígidos de la cadena Bética debido a la presencia de los complejos de las Béticas Internas: Nevado filábrides, Alpujárrides y Maláguides, y las grandes cuencas intramontañosas de Granada, Guadix y Baza. Los límites norte y sur de las zonas son bastante claros, tanto en cuanto a la distribución de la sismicidad, como en el cambio de espesor de la corteza hacia Alborán. La zona 40 básicamente representa un área más adelgazada de la corteza del Mar de Alborán, y recoge la sismicidad asociada a las estructuras de la zona interna del Arco de Gibraltar.

Las zonas 28, 29, 30 y 31, abarcan la región más exterior de la cadena Bética, caracterizada por escasa sismicidad, corteza ligeramente engrosada y elevada complejidad estructural. La zona 29 incluye la cuenca del Guadalquivir y los depósitos marginales deformados, y el límite entre ellas está basado en la distribución de la sismicidad y el aumento en el número de mecanismos focales de desgarre hacia el este. La zona 30 engloba el macizo de Cazorla y la zona 31 abarca buena parte del Prebético Alicantino, que se caracteriza por una sucesión de cuencas y sierras limitadas por fallas con componente de desgarre significativa y normales asociadas a la influencia del surco de Valencia, que induce además una corteza más delgada que la de la zona 30.

4.3 DATOS DE ENTRADA

4.3.1 Catálogo sísmico

Para la elaboración del catálogo sísmico del estudio, se ha partido del catálogo sísmico confeccionado a su vez en el Proyecto “*Servicio de actualización del riesgo sísmico en la Región de Murcia* (RISMUR, 2015)”. A su vez, en este proyecto se partió del catálogo elaborado para el nuevo *Mapa de peligrosidad sísmica de España (MPSE)* (IGN-UPM, 2012), que servirá de base para la revisión de la norma sismorresistente NCSE02. Este último contenía principalmente información del catálogo oficial del IGN, cubriendo un periodo de sismicidad entre los años 1048 y 2011. Dicho catálogo fue completado y mejorado con catálogos de otras instituciones oficiales españolas, como el Instituto Andaluz de Geofísica (IAG) y el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC). De igual manera, se incluyeron revisiones de otras agencias como el ISC, NEIC, Sisfrance y terremotos del norte de África obtenidos de los catálogos de Marruecos y Argelia. También se incluyeron resultados de diversas publicaciones en las que se estimaba específicamente el tamaño de algunos terremotos históricos, como los trabajos de Susagna y Goula (1999), Martínez Solares y Mezcua (2002), Stich et al. (2003), Mezcua et al. (2004), Peláez et al. (2007), Batlló et al. (2008), Stich et. al (2010), Hamdache et al. (2010), entre otros.

Para el desarrollo de esta tesis, el catálogo ha sido actualizado al último día del mes de julio del año 2016 con información proveniente de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional, incluyendo sólo los sismos contenidos en la zona de influencia. Se han eliminado además los sismos con profundidades mayores a 65 km, por considerar que no presentan contribución significativa en la peligrosidad.

Se realizó también un filtrado por tamaño, considerando únicamente aquellos registros de magnitud momento mayor o igual a 3.0, ya que los sismos menores a esta magnitud no presentan peligro potencial.

Con las indicaciones hechas, se añadieron 678 registros nuevos al catálogo de partida, obteniendo un total de 3600 eventos inicialmente, antes de aplicar los procesos de homogeneización y depuración necesarios para el cálculo de la peligrosidad (Figura 4.6).

Figura 4.6. Catálogo de partida actualizado al año 2016, con sismos de $M_w \geq 3.5$.

- Homogeneización del catálogo

Para realizar la necesaria homogeneización entre parámetros de tamaño de los nuevos registros incluidos a magnitud momento M_w , se aplicaron las mismas correlaciones definidas en el *MPSE*, expuestas en el *Capítulo 3* (Tabla 3-1, Figuras 3.6 y Figura 3.7), para abarcar el periodo de 2011 a 2016.

A su vez, al igual que se hizo con el catálogo de partida y utilizando el mismo criterio de experto, se le ha asignado a cada uno de estos nuevos terremotos una incertidumbre, dependiendo del tipo de parámetro de tamaño original (I , $mblg$, ML , etc) y también de su época de registro, y se ha estimado la incertidumbre asociada a la magnitud final M_w por propagación de errores, mediante la expresión:

$$\sigma_{M_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial M_w}{\partial M_i}\right)^2 \sigma_{M_i}^2 + \left(\frac{\partial M_w}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial M_w}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2 + 2 \frac{\partial M_w}{\partial a} \frac{\partial M_w}{\partial b} \sigma_{ab}} \quad [4-1]$$

Donde:

M_w es la magnitud momento final asignada, igual a:

$$M_w = a + b \times M_i \quad [4-2]$$

a y b son los parámetros de la recta de ajuste

M_i es el valor del parámetro de tamaño origen

σ_a^2 , σ_b^2 , σ_{ab}^2 son las varianzas de los parámetros

σ_{ab} es la covarianza de los parámetros de la recta de correlación

Las incertidumbres asignadas al catálogo original se realizaron mediante juicio de experto, atendiendo a la naturaleza de los parámetros de tamaño originales y a la época del registro. El criterio seguido consistió en asignar mayor incertidumbre a los datos más antiguos, especialmente los derivados a partir de la intensidad macrosísmica. Las incertidumbres consideradas en el cálculo de MPSE (IGN-UPM, 2012), que son las asumidas en trabajo se muestran en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Incertidumbres asociadas a los parámetros originales de tamaño en el catálogo sísmico.

Parámetro origen	Parámetro de calidad	Incertidumbre asociada
lo -IGN	A, B, C	$\sigma=0.5$ (A); $\sigma=1.0$ (B); $\sigma=1.5$ (C)
lo marinos -IGN	A, B, C	$\sigma(\text{lo-IGN}) + 0.5$
lo -ICC	1, 2	$\sigma=0.5$ (1); $\sigma=1.0$ (2)
mD (MMS83)		$\sigma=0.4$
mbLg(MMS)		$\sigma=0.3$ (<1985); $\sigma=0.2$ (>1985)
mb(VC)		$\sigma=0.2$
mbLg(L)		$\sigma=0.2$
Mw		$\sigma=0.1$

- Depuración del catálogo

En el MCZ se asume que la sismicidad de cada zona sismogénica sigue un proceso de Poisson, por lo que el catálogo ha sido depurado de series sísmicas mediante el uso de ventanas espaciales y temporales que permiten identificar las réplicas y premonitores asociados a un sismo principal. Se han aplicado las ventanas definidas por Gardner y Knoppoff (1974), con una calibración del límite inferior con series españolas a partir del año 2002, con terremotos principales de M_w próxima a 3.0, utilizado también para el MPSE. Las ventanas espacio-temporales utilizadas se muestran en la Figura 3.6 del Capítulo 3.

Para incorporar las incertidumbres asociadas a la magnitud M_w , se ha aplicado un método de Montecarlo, mediante la simulación de 1000 catálogos sintéticos. De esta manera, se calcula la frecuencia de cada sismo sea catalogado como réplica, aplicando las ventanas espacio-temporales. La implementación de este proceso de depuración del catálogo, se ha realizado a través de un programa

en C++, que permite introducir como variables las ventanas, el número de ejecuciones de Montecarlo y el rango de búsqueda de eventos dentro del catálogo.

En este proceso de depuración, resultaron identificados como réplicas el 31,6% de los registros, por lo que el catálogo resultante tras la homogeneización y depuración cuenta entonces con 3216 eventos principales, cuyos epicentros se muestran la Figura 4.7.

Figura 4.7. Distribución de sismos principales con magnitud mayor o igual a $M_w 3.5$. resultantes del proceso de depuración .

▪ Análisis de completitud

Se han considerado como años de referencia que inician los periodos denominados de *completitud* para cada rango de magnitud, los mismos años identificados para el catálogo del *MPSE* para las zonas contenidas en el área de influencia de la ciudad de Lorca. Dichos años se establecieron para intervalos de magnitud de 0.5 y son los indicados en la Tabla 4-6.

A partir de esos años se determinarán las tasas de ocurrencia de sismos para cada intervalo de magnitud, únicamente abarcando el periodo de completitud, definido desde el correspondiente año de referencia hasta la actualidad. Estas tasas se consideran constantes, y se pueden usar para estimar (mediante extrapolación) el número hipotético de terremotos ocurridos durante todo el periodo abarcado por el catálogo (en nuestro caso, desde 1048), aunque estos no hayan sido documentados.

Tabla 4-6. Años de referencia considerados para la corrección por falta de completitud de diferentes rangos de magnitud.

	3.0-3.4	3.5-3.9	4.0-4.4	4.5-4.9	5.0-5.4	5.5-5.9	6.0-6.4	6.5-..
COMPLETO	1985	1980	1933	1910	1800	1720	1152	1152
SE ESPAÑA	1978	1975	1908	1883	1800	1520	1048	1048

▪ Catálogo final

El catálogo final de proyecto, resultante de los procesos de homogenización, depuración y corrección por falta de completitud, filtrado para la zona de influencia de Lorca y considerando magnitudes a partir de $M_w \geq 3.5$, contiene 1058 eventos. Las siguientes tablas incluyen el número de eventos del catálogo final dividido por periodos de actualización de la red sísmica (Tabla 4-7) y las características del catálogo final (Tabla 4-8).

Tabla 4-7. Número de eventos del catálogo final de proyecto, por periodos de actualización de la red sísmica.

Periodo	Número de terremotos
Histórico (Hasta 1923)	152
1924-1962 (Hasta 11/2)	241
1963-1998 (Hasta 24/2)	437
1999-2002 (Hasta 27/2)	35
2003-2011 (Hasta 30/6)	92
2011-2016 (Hasta 18/9)	101
TOTALES	1058

Tabla 4-8. Características principales del catálogo de proyecto

Número de terremotos:	1058
Periodo:	Año 1048 a 31/07/2016
Área:	[(41.2N, 6.2W)-(34.4N, 2.7E)]
Tipo de magnitud:	Magnitud momento (Mw)
Rango de magnitud:	3.5-7.2
Profundidad:	0 – 65 km

En la Figura 4.8 se muestra el mapa con la localización epicentral de los eventos contenidos en este catálogo de proyecto, para el área de influencia de ciudad de Lorca. La Figura 4.9 muestra el número de terremotos de cada magnitud a partir de Mw 3.5.

Figura 4.8. Mapa del catálogo final de proyecto para la zona de influencia de la ciudad de Lorca.

Figura 4.9. Número de sismos por magnitud Mw, incluidos en el catálogo final de estudio.

4.3.2 Caracterización de las fuentes sísmicas

Una vez confeccionado el catálogo de proyecto, se procede a modelizar las fuentes sísmicas, de acuerdo a las zonificaciones seleccionadas y las fallas activas consideradas para el estudio. Se aplicarán los dos métodos propuestos en el capítulo de Propuesta Metodológica de esta tesis: el método clásico zonificado y la metodología híbrida que combina zonas y fallas.

4.3.2.1 Método clásico zonificado (MCZ)

El primer paso para aplicar el método zonificado, una vez seleccionada la zonificación y las zonas sismogénicas contenidas en el área de influencia, es superponer las zonas con el catálogo de proyecto elaborado. La Figura 4.10 muestra los sismos del catálogo contenidos en las zonas sismogénicas que se incluyen en el área de influencia de la ciudad de Lorca, según la zonificación de García-Mayordomo (2012).

A partir de los sismos de cada zona se calcula la ley de recurrencia. Para esta aplicación se ha adoptado el modelo de Gutenberg-Richter modificado, ajustando la recta con los sismos de la zona y tomando en cuenta su distribución de incertidumbres. Este ajuste se ha realizado por medio del método de máxima verosimilitud (Aki, 1965; Bender, 1983), recomendado en la propuesta metodológica. Las incertidumbres de las magnitudes del catálogo fueron incluidas en el cálculo por medio de un método estocástico de Montecarlo.

Figura 4.10. Superposición del catálogo de proyecto con las zonas sismogénicas de GM12 contenidas en el área de influencia de la ciudad de Lorca.

Finalmente, los parámetros obtenidos de este ajuste para representar la recurrencia de cada zona sismogénica son el parámetro β (pendiente de la recta), con su desviación estándar (σ_β), y la tasa de actividad o número anual de terremotos con magnitudes que superan la magnitud mínima considerada, $\dot{N}(M_{\min})$, correspondiente a la media obtenida en las simulaciones de Montecarlo. La magnitud mínima ($M_{\min}$) establecida para el cálculo de la tasa fue de M_w 4.0. Los parámetros resultantes para cada zona se muestran en la Tabla 4-9.

Para establecer la $M_{\max}$ esperada en las fuentes que contienen fallas activas, se estimaron las magnitudes máximas de las fallas de acuerdo a su geometría, a través de las ecuaciones de Wells y Coppersmith (1994), Stirling (2002) y Stirling (2008), y se ajustaron a una distribución gaussiana. Se tomó como umbral inferior de la distribución la magnitud máxima observada en el catálogo [$M_{\max}(\min)$] y como umbral superior la magnitud máxima estimada a partir de las fallas [$M_{\max}(\max)$]. La $M_{\max}$ esperada en cada fuente corresponde al valor medio de la distribución y la desviación estándar

de la magnitud corresponde al intervalo entre la media y los extremos de la distribución [$M_{\max}(\min)$ y $M_{\max}(\max)$].

En el caso de algunas zonas, la magnitud máxima de truncamiento fue disminuida respecto a la observada en la distribución, según criterio de experto, por considerarse excesivamente elevada para la zona.

En la zonas que no contienen fallas, la magnitud máxima fue establecida como la magnitud máxima observada en el catálogo en esa zona, más la mitad de la incertidumbre asociada a esa magnitud en el catálogo.

Las magnitudes máximas extremas resultantes del proceso seguido, $M_{\min}$ y $M_{\max}$, además de las medias, junto a su desviación estándar se muestran para cada zona en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9. Parámetros de la recta Gutenberg-Richter y magnitudes máximas para las zonas sismogénicas de GM12.

Zona	β	$\bar{N}(4.0)$	$\sigma(\beta)$	$M_{\max}$ media	$\sigma(M_{\max})$	$M_{\max}$ min	$M_{\max}$ max
12	2.37	0.12	0.27	5.2	0.1	4.9	5.4
26	2.40	0.08	0.29	5.7	0.1	5.4	5.9
29	2.38	0.21	0.15	6.6	0.4	6.2	6.9
30	2.12	0.12	0.33	5.0	0.4	4.6	6.3
31	1.91	0.25	0.12	6.6	0.4	6.5	7.1
34	2.13	0.23	0.13	6.6	0.3	6.3	7.0
35	2.20	0.55	0.09	6.8	0.3	6.5	7.1
36	2.17	0.14	0.18	6.6	0.4	6.2	7.0
37	1.98	0.41	0.13	6.8	0.2	5.4	7.0
38	2.20	0.37	0.10	6.7	0.2	6.5	6.9
39	2.11	0.11	0.32	6.7	0.1	4.8	6.9
40	2.34	0.16	0.18	6.5	0.3	6.0	6.8
41	2.18	0.14	0.28	5.0	0.1	4.7	5.2
43	2.13	0.54	0.09	6.5	0.1	6.3	6.8
44	1.81	0.18	0.16	6.3	0.1	6.0	6.5
45	1.99	0.35	0.10	7.0	0.1	6.8	7.3
46	1.80	0.44	0.08	7.5	0.1	7.2	7.7
55	1.90	0.51	0.08	6.7	0.3	6.6	7.4

4.3.2.2 Metodología híbrida de zonas y fallas (MHZF)

Como se mencionó en el *Apartado 4.2.1*, para esta metodología se ha seleccionado la zonificación de García-Mayordomo GM10, por haber sido diseñada especialmente para la inclusión de fallas en el cálculo de la peligrosidad. La Figura 4.11 muestra la superposición del catálogo con las zonas de ésta zonificación que quedan englobadas en la zona de influencia de Lorca.

Figura 4.11. Superposición del catálogo de proyecto con las zonas sismogénicas de GM10 contenidas en el área de influencia de ciudad de Lorca.

Cada zona sismogénica representa geométricamente lo que en esta metodología se denomina una **región**. De este modo, las regiones y las zonas tendrán la misma geometría, pero la región contendrá toda la sismicidad potencial asociada a las fallas más la sismicidad asignada a la zona. La zona representará entonces la sismicidad asociada a fallas que no se conocen o que no pueden ser modelizadas por no existir información suficiente acerca de las mismas. Dicho de otra manera: el **potencial sísmico de la región es igual al potencial sísmico de las fallas** (como fuentes independientes) **más el potencial sísmico de la zona**.

El primer paso a realizar para aplicar esta metodología consiste en determinar qué fallas y segmentos de fallas están contenidas en cada región. Para este fin, se ha superpuesto el catálogo de fallas activas seleccionadas con las regiones de la zonificación GM10. (Figura 4.13). En los casos en que una falla se superpone con dos regiones, se considerará la región que intersecta con el mayor tramo de la misma. A partir de esta superposición, para el caso de estudio se observan 5 regiones que se dividirán como zonas y fallas. El número de fallas y segmentos de fallas contenidos dentro de cada una de estas regiones se muestra en la Figura 4.14. Las zonas que no contengan fallas serán caracterizadas de igual manera que en el método clásico zonificado.

Para modelizar las fallas como fuentes independientes se asume el plano de ruptura de las mismas como un plano rectangular idealizado, tal como son representadas generalmente. Esto se debe a que aunque en la realidad suelen presentar rupturas en superficies irregulares, es muy difícil contar con información suficiente para poder modelizar la geometría de ruptura de manera precisa, por lo que generalmente se asume un plano simplificado de la misma. De esta manera, con la información que se tiene de la geometría de las fallas: longitud, ancho, profundidad, ángulo de acimut y buzamiento, con respecto a una coordenada de origen, se obtienen el resto de coordenadas que permiten delimitar este plano. (Figura 4.12)

Figura 4.12. Parámetros geométricos y características de la falla.

Figura 4.13. Superposición de las fallas y segmentos de fallas consideradas para la aplicación de la metodología MHZF, con las regiones de GM10.

Figura 4.14. Número de fallas contenidas dentro de cada región.

- Tasa de momento sísmico, tasa de sismicidad y parámetro b en las diferentes fuentes.

La metodología híbrida aplicada según los fundamentos explicados en el *Apartado 3.3.2.2 del Capítulo 3*, estima la tasa de momento sísmico registrada en cada región y la reparte entre las fuentes contenidas en ella. Aplicando esta metodología se obtienen las tasas de sismicidad y de momento sísmico para las 5 regiones que incluyen fallas y los correspondientes valores de β .

El valor del parámetro β de la región se obtiene a partir de la tasa de sismicidad observada en el catálogo sísmico (aplicando un modelo de recurrencia de GR modificado), y de la tasa de momento sísmico (calculada con la ecuación de Anderson (1979), ver Anexo A).

La Tabla 4-10 muestra los valores de la tasa de sismicidad $\dot{N}(m)$, tasa de momento sísmico $\dot{M}_0$ y el parámetro β , observados en cada región.

Tabla 4-10. Tasas de sismicidad y de momento sísmico observados en cada región, para el intervalo $[M_{min}, MMC]$, así como los valores de β obtenidos. MMC representa la magnitud máxima de completitud de cada región.

Región	Mmin	MMC	$\dot{N}(4.0-MMC)$	$\dot{M}_0$ (Nm/año)	β región= β zona
30	4.0	4.6	0.052	1.81E+21	2.000
31	4.0	5.7	0.232	4.78E+22	1.920
37	4.0	5.4	0.421	7.86E+22	1.187
38	4.0	5.4	0.546	5.67E+22	2.327
39	4.0	5.4	0.273	3.82E+22	1.742

- Reparto del potencial sísmico

Tal como establece esta metodología, el potencial sísmico de la falla que se resta del potencial observado en la región no corresponde al potencial sísmico completo que puede llegar a generar la falla de acuerdo a su geometría, sino solamente el correspondiente al intervalo de magnitudes observadas de manera completa en el catálogo, es decir, el intervalo $[M_{min}, MMC]$.

El potencial de la falla estará dividido entonces en tres intervalos: $[0, M_{min}]$, $[M_{min}, MMC]$ y $[MMC, M_{max\text{falla}}]$. Utilizaremos para el reparto sólo el potencial correspondiente al intervalo $[M_{min}, MMC]$. Sin embargo, de entrada al cálculo, la falla será incluida con todo su potencial hasta la magnitud máxima de la misma. Esta división de intervalos se muestra gráficamente en la Figura 4.15.

Al mismo tiempo, el modelo de recurrencia que se asignará a las fallas será el de GR modificado y se considerará que todas las fallas contenidas en una misma zona tendrán igual valor de β . En este caso, el parámetro β de la zona se asume igual al parámetro β observado en la región. Los valores de β obtenidos para las fallas se muestran en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11. Parámetro obtenido para las fallas.

Zona	β Falla
30	1.800
31	1.896
37	1.239
38	2.258
39	1.742

Las tasas de sismicidad y tasa de momento sísmico, tanto para el reparto de potencial en el intervalo $[M_{min}, MMC]$ como para el intervalo $[M_{min}, M_{max}]$ de la falla, obtenidos utilizando los *slip rates* del QAFI, se muestran en la Tabla 4-12 a Tabla 4-16.

Una vez obtenidas las tasas de momento sísmico de las fallas y sus tasas de sismicidad, se obtienen las tasas restantes para la zona, sustrayendo las tasas de las fallas de las tasas observadas en la región. Los resultados obtenidos de este reparto se presentan en la Tabla 4-17, utilizando los *slip rates* del QAFI, y en la Tabla 4-18 se muestran los resultados para las zonas que contienen fallas con *slip rates* derivados de medidas geodesicas.

Nótese como, para el caso de los resultados obtenidos con los *slip rates* geodésicos, las tasas de sismicidad restantes para las zonas disminuyen, puesto que al aumentar los *slip rates* el potencial de las fallas se incrementa llevándose un mayor porcentaje del potencial sísmico observado en la región. En el caso de la zona 37, el porcentaje del reparto de potencial asociado a la falla duplica su valor, debido a los *slip rates* de las fallas de Alhama de Murcia. En la zona 38, el incremento también es notable, debido al aumento de *slip rates* de las fallas de Palomares. Esto pone de manifiesto la sensibilidad de los valores de *slip rates* en esta metodología.

Figura 4.15. Reparto de la tasa de momento sísmico de la falla, en los intervalos de magnitud conocidos.

Los gráficos mostrados bajo las tablas presentadas a continuación representan los intervalos de magnitudes considerados para el reparto de la tasa de sismicidad y tasa de momento sísmico de cada falla, de acuerdo a los intervalos y código de colores mostrados en la Figura 4.15.

Tabla 4-12. Tasas sísmicas y de momento sísmico de las fallas de la Zona 30 para el reparto en el intervalo [Mmin,MMC] (color naranja medio) y en el intervalo [Mmin,Mmax] (color naranja oscuro). El gráfico bajo la tabla muestra las magnitudes máximas de cada falla y la MMC observada en la zona, Mmin=4.0.

Tabla 4-13. Tasas sísmicas y de momento sísmico de las fallas de la Zona 31 para el reparto en el intervalo $[M_{min}, MMC]$ (color naranja medio) y en el intervalo $[M_{min}, M_{max}]$ (color naranja oscuro). El gráfico bajo la tabla muestra las magnitudes máximas de cada falla y la MMC observada en la zona, $M_{min}=4.0$.

ID	Nombre	$\dot{N}(m)$	$\dot{M}_0$	$\dot{N}(m)$	$\dot{M}_0$
ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	0.007	9.03E+21	10.750	9.12E+21
ES622	Muro de Alcoy (o de Mariola)	0.016	6.38E+21	27.025	6.59E+21
ES624	Benasau	0.015	5.11E+21	25.428	5.31E+21
ES634	Jumilla (Sector Valencia) (1/2)	0.007	9.47E+21	11.267	9.56E+21
ME005	Cabo de Cullera Western Fault	0.004	4.45E+21	6.200	4.50E+21
ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	0.004	3.66E+21	5.970	3.71E+21
ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	0.003	4.87E+21	4.949	4.90E+21
ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	0.002	1.53E+21	3.429	1.56E+21
ME009	Southwest of Columbretas Basin	0.002	9.53E+20	2.931	9.76E+20

Tabla 4-14. Tasas sísmicas y de momento sísmico de las fallas de la Zona 37 para el reparto en el intervalo $[M_{min}, MMC]$ (color naranja medio) y en el intervalo $[M_{min}, M_{max}]$ (color naranja oscuro). El gráfico bajo la tabla muestra las magnitudes máximas de cada falla y la MMC observada en la zona, $M_{min}=4.0$.

ID	Nombre	$\dot{N}(m)$	$\dot{M}_0$	$\dot{N}(m)$	$\dot{M}_0$
ES601	Crevillente (Sector Murcia) (1/3)	0.004	1.54E+22	0.532	1.54E+22
ES602	Crevillente (Sector Murcia) (2/3)	0.004	1.96E+22	0.543	1.97E+22
ES603	Crevillente (Sector Murcia) (3/3)	0.004	9.62E+21	0.518	9.64E+21
ES604	Crevillente (Sector Alicante) (1/2)	0.003	1.08E+22	0.373	1.08E+22
ES605	Jumilla (Sector Murcia) (1/3)	0.000	1.22E+21	0.042	1.22E+21
ES606	Jumilla (Sector Murcia) (2/3)	0.000	1.21E+21	0.042	1.21E+21
ES607	Jumilla (Sector Murcia) (3/3)	0.002	2.99E+21	0.201	3.00E+21
ES626	Alhama de Murcia (1/4)	0.018	6.79E+22	2.346	6.80E+22
ES627	Alhama de Murcia (2/4)	0.011	2.56E+22	1.377	2.56E+22
ES628	Alhama de Murcia (3/4)	0.000	0.00E+00	0.000	0.00E+00
ES629	Alhama de Murcia (4/4)	0.000	0.00E+00	0.000	0.00E+00
ES631	Amarguillo	0.002	2.95E+21	0.309	2.96E+21
ES632	Las Viñas	0.006	2.53E+21	0.810	2.57E+21
ES684	Botardo-Alfahuara	0.001	4.13E+21	0.178	4.14E+21
ES716	Albox	0.001	8.58E+20	0.090	8.63E+20
ES729	Socovos (2/2)	0.009	3.99E+22	1.105	4.00E+22
ES769	La Junquera-Mancheño	0.005	7.26E+21	0.610	7.29E+21

Tabla 4-15. Tasas sísmicas y de momento sísmico de las fallas de la Zona 38 para el reparto en el intervalo $[M_{min}, MMC]$ (color naranja medio) y en el intervalo $[M_{min}, M_{max}]$ (color naranja oscuro). El gráfico bajo la tabla muestra las magnitudes máximas de cada falla y la MMC observada en la zona, $M_{min}=4.0$.

ID	Nombre	$\dot{N}(m)$	$\dot{M}_0$	$\dot{N}(m)$	$\dot{M}_0$
ES609	Palomares (1/2)	0.006	4.46E+21	42.281	4.58E+21
ES611	Corredor de Las Alpujarras (Sector Almería)	0.012	9.50E+21	79.647	9.73E+21
ES625	Alhamilla Sur	0.006	3.31E+21	40.199	3.43E+21
ES630	Carboneras (1/2)	0.358	4.12E+23	2392.411	4.19E+23
ES635	Polopos fault zone (1/2)	0.003	9.79E+20	19.605	1.04E+21
ES636	Polopos fault zone (2/2)	0.004	1.31E+21	26.207	1.39E+21

Tabla 4-16. Tasas sísmicas y de momento sísmico de las fallas de la Zona 39 para el reparto en el intervalo $[M_{min}, MMC]$ (color naranja medio) y en el intervalo $[M_{min}, M_{max}]$ (color naranja oscuro).

ID	Nombre	$\dot{N}(m)$	$\dot{M}_0$	$\dot{N}(m)$	$\dot{M}_0$
ES610	Palomares (2/2)	0.008	1.06E+22	7.322	1.07E+22
ES612	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (1/3)	0.003	4.47E+21	2.599	4.50E+21
ES613	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (2/3)	0.003	3.60E+21	2.492	3.63E+21
ES614	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (3/3)	0.003	5.69E+21	2.787	5.72E+21
ES615	Carrascoy	0.046	7.15E+22	41.615	7.20E+22
ES616	Torrevieja	0.008	8.97E+21	7.373	9.06E+21
ES617	San Miguel de Salinas	0.035	5.41E+22	31.458	5.44E+22
ES618	Bajo Segura (1/3)	0.025	1.62E+22	22.466	1.65E+22
ES619	Bajo Segura (2/3)	0.016	8.68E+21	14.284	8.85E+21
ES620	Bajo Segura (3/3)	0.012	7.90E+21	10.920	8.03E+21
ES743	West Cabezo Gordo (Murcia - Mar Menor)	0.006	8.69E+21	5.058	8.75E+21
ES745	El Cantal	0.003	1.64E+21	2.699	1.67E+21
ES746	Garrovilla	0.001	3.04E+20	1.011	3.16E+20
ES750	La Puebla	0.005	6.76E+21	4.672	6.81E+21
ES756	La Galera	0.003	1.64E+21	2.707	1.68E+21
ES760	Los Tollos	0.008	5.86E+21	6.812	5.94E+21
ES761	Falla de Águilas	0.002	1.42E+21	1.645	1.44E+21
ME021	Bajo Segura Offshore	0.017	2.57E+22	14.986	2.59E+22
ME023	Santa Pola	0.003	4.80E+21	2.796	4.84E+21

Tabla 4-17. Reparto de las tasas de sismicidad y momento sísmico obtenido con los *slip rates* del QAFI (%: representa el porcentaje de tasa de momento sísmico de la región asociado a las fallas y a la zona en el intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo (Mmin, MMC). %= $\dot{M}_o$ (Mmin – MMC) falla o zona/ $\dot{M}_o$ (Mmin – MMC) región.

Región	Fuente	$\dot{N}_{min}$ (Mmin - MMC)	$\dot{M}_o$ (Mmin –MMC)	%
30	Zona	0.044	1.49E+21	81%
	Σ Fallas	0.010	3.50E+20	19%
	Total	0.054	1.84E+21	
31	Zona	0.174	3.58E+22	75%
	Σ Fallas	0.058	1.20E+22	25%
	Total	0.232	4.78E+22	
37	Zona	0.360	6.71E+22	85%
	Σ Fallas	0.061	1.14E+22	15%
	Total	0.421	7.86E+22	
38	Zona	0.169	1.76E+22	31%
	Σ Fallas	0.376	3.91E+22	69%
	Total	0.546	5.67E+22	
39	Zona	0.08	1.12E+22	29%
	Σ Fallas	0.193	2.70E+22	71%
	Total	0.273	3.82E+22	

Tabla 4-18. Reparto de las tasas de sismicidad y momento sísmico con los *slip rates* en las zonas 37 y 38, con las fallas con *slip rates* obtenidos por geodesia. (%: representa el porcentaje de tasa de momento sísmico de la región asociado a las fallas y a la zona en el intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo (Mmin, MMC). %= $\dot{M}_o$ (Mmin – MMC) falla o zona/ $\dot{M}_o$ (Mmin – MMC) región.

Región	Fuente	$\dot{N}_{min}$ (Mmin - MMC)	$\dot{M}_o$ (Mmin –MMC)	%
37	Zona	0.263	4.90E+22	62%
	Σ Fallas	0.159	2.96E+22	38%
	Total	0.421	7.86E+22	
38	Zona	0.059	6.09E+21	11%
	Σ Fallas	0.487	5.06E+22	89%
	Total	0.546	5.67E+22	
39	Zona	0.08	1.12E+22	29%
	Σ Fallas	0.193	2.70E+22	71%
	Total	0.273	3.82E+22	

Tabla 4-19. Parámetros de las fuentes finales para el cálculo de la peligrosidad (slip rates del QAFI).

Fuente	Mmin	Mmax	Ṅmin (QAFI)	β
ES728	4	7	0.005	1.8
ES730	4	6.7	0.008	1.8
ES765	4	5.7	0.000	1.8
ES766	4	5.9	0.000	1.8
Zona 30	4	5.1	0.044	2.22
ES608	4	6.9	0.007	1.9
ES622	4	6.1	0.016	1.9
ES624	4	6	0.015	1.9
ES634	4	6.9	0.007	1.9
ME005	4	6.8	0.004	1.9
ME006	4	6.7	0.004	1.9
ME007	4	7	0.003	1.9
ME008	4	6.5	0.002	1.9
ME009	4	6.3	0.002	1.9
Zona 31	4	6.2	0.174	1.92
ES601	4	6.8	0.004	1.24
ES602	4	6.9	0.004	1.24
ES603	4	6.6	0.004	1.24
ES604	4	6.8	0.003	1.24
ES605	4	6.8	0.000	1.24
ES606	4	6.8	0.000	1.24
ES607	4	6.5	0.002	1.24
ES626	4	6.8	0.018	1.24
ES627	4	6.6	0.011	1.24
ES628	4	6.4	0.000	1.24
ES629	4	6.7	0.000	1.24
ES631	4	6.3	0.002	1.24
ES632	4	5.8	0.006	1.24
ES684	4	6.7	0.001	1.24
ES716	4	6.3	0.001	1.24
ES729	4	6.9	0.009	1.24
ES769	4	6.4	0.005	1.24
Zona 37	4	6.2	0.356	1.19

Fuente	Mmin	Mmax	Ṅmin (QAFI)	β
ES609	4	6.9	0.006	2.26
ES611	4	7	0.012	2.26
ES625	4	6.7	0.006	2.26
ES630	4	7.3	0.358	2.26
ES635	4	6.3	0.003	2.26
ES636	4	6.3	0.004	2.26
Zona 38	4	5.4	0.169	2.33
ES610	4	6.7	0.008	1.74
ES612	4	6.8	0.003	1.74
ES613	4	6.7	0.003	1.74
ES614	4	6.9	0.003	1.74
ES615	4	6.8	0.046	1.74
ES616	4	6.6	0.008	1.74
ES617	4	6.8	0.035	1.74
ES618	4	6.3	0.025	1.74
ES619	4	6.2	0.016	1.74
ES620	4	6.3	0.012	1.74
ES743	4	6.8	0.006	1.74
ES745	4	6.2	0.003	1.74
ES746	4	5.8	0.001	1.74
ES750	4	6.7	0.005	1.74
ES756	4	6.2	0.003	1.74
ES760	4	6.4	0.008	1.74
ES761	4	6.4	0.002	1.74
ME021	4	6.8	0.017	1.74
ME023	4	6.8	0.003	1.74
Zona 39	4	5.4	0.080	1.74

Tabla 4-20. Parámetros de las fuentes finales con slip rates de geodesia, para el cálculo de la peligrosidad

Fuente	Mmin	Mmax	Ṅmin(GEO)	β
ES626	4	6.8	0.050	1.24
ES627	4	6.6	0.048	1.24
ES628	4	6.4	0.034	1.24
ES629	4	6.7	0.007	1.24
Zona 37	4	6.2	0.263	1.19

Fuente	Mmin	Mmax	Ṅmin(GEO)	β
ES609	4	6.9	0.024	2.26
ES630	4	7.3	0.455	2.26
Zona 38	4	5.4	0.059	2.33
ES610	4	6.7	0.008	1.74
Zona 39	4	5.4	0.080	1.74

4.3.3 Selección de modelos de atenuación

Para analizar los modelos que representen de la manera más realista la atenuación en la región, se aplicó un análisis de residuos a los cinco modelos publicados en la NGA-West 2: Abrahamson et al. 2013 (ASK13), Boore et al. 2013 (BSSA13), Campbell y Bozorgnia 2013 (CB13), Chiou y Youngs 2013 (CY13) e Idriss 2013 (I13).

Para este análisis se utilizó una base de datos acelerométrica configurada a partir de los registros de la red sísmica del Instituto Geográfico Nacional, compuesta por un total de 155 registros correspondientes a 48 sismos con magnitudes M_w entre 3.0 y 5.1 y distancias epicentrales hasta 300 km. El periodo abarcado por la base de datos data de 1984 hasta la fecha actual.

Para cada registro se ha recopilado información sobre su mecanismo focal y geometría de la falla, permitiendo calibrar de la mejor manera los modelos más completos de la NGA-West 2.

Para caracterizar el suelo de acuerdo a los modelos, se asignó un valor de V_{s30} según la clasificación de suelos del NEHRP y el Eurocódigo 8, a la clase de suelo asociada a cada estación.

Finalmente, con esta información se realizó el contraste de los modelos con los datos locales de la base de datos, tanto para PGA como para las ordenadas espectrales de $S_a(0.1s)$ para representar los cortos periodos y $S_a(1s)$ para los largos periodos. El análisis se realizó siguiendo los métodos de Sherbaum (2004) y Kale & Akkar (2012) (Ver Anexo B).

Los resultados de la calibración con el método de Sherbaum (2004) se muestran en la Tabla 4-21. A partir de los estimadores estadísticos obtenidos se asignaron las clases establecidas por el método en función del grado de ajuste de los datos al modelo, siendo la clase A la representativa de un ajuste óptimo de los datos al modelo y la clase D la de peor ajuste. Como se puede observar en la Figura 4.16, los modelos que presentan un mejor ajuste de acuerdo a estas clases son los modelos de ASK13 y CB13.

Por otra parte, la Tabla 4-22 muestra los resultados obtenidos según la calibración realizada por el método de Kale y Akkar (2012). La Figura 4.17 muestra la distribución de valores de los indicadores MDE, K y EDR para los cinco modelos de atenuación calibrados para PGA, $S_a(0.1s)$ y $S_a(1.0s)$. Los menores valores de MDE y EDR muestran un mejor ajuste, mientras que el valor ideal del parámetro K es igual a 1. De acuerdo a esto, se observa nuevamente que los modelos que presentan mejor ajuste son los de ASK13 y CB13 para cortos periodos, aunque para ambos métodos, el modelo CY13 presenta un mejor ajuste para los largos periodos, $S_a(1s)$.

Tabla 4-21. Resultados de la calibración por el método de Sherbaum et. al (2004) para los cinco modelos de atenuación calibrados para PGA, Sa(0.1s) y Sa(1.0s).

MODELO	MEDIANA LH	MEDIANA Z	MEDIA Z	SIGMA Z	CLASE			
PGA								
ASK13	0.37	0.38	0.35	1.391	B	B	B	C
CB13	0.24	0.41	0.57	1.902	C	B	C	D
CY13	0.18	1.11	1.03	1.52	D	D	D	C
BSSA13	1.08	1.08	1.23	1.214	A	D	D	B
I13	0.02	2.33	2.09	1.647	D	D	D	D
0.1 s								
ASK13	0.36	0.49	0.43	1.417	B	B	B	C
CB13	0.26	0.58	0.75	1.814	C	C	C	D
CY13	0.08	1.75	1.83	1.64	D	D	D	D
BSSA13	1.86	1.86	2.02	1.430	A	D	D	D
I13	0.09	1.66	1.60	1.389	D	D	D	D
1.0 s								
ASK13	0.30	0.63	0.70	1.394	A	C	C	C
CB13	0.33	0.28	0.27	1.510	B	B	B	D
CY13	0.33	0.21	0.13	1.42	B	A	A	C
BSSA13	0.32	0.32	0.41	1.061	B	B	B	A
I13	0.04	2.09	1.97	1.415	D	D	D	C

Figura 4.16. Clases obtenidas para cada modelo de atenuación según el método Sherbaum (2004) para PGA.

Tabla 4-22. Resultados de la calibración por el método de Kale y Akkar (2012) para los cinco modelos de atenuación calibrados para PGA, $S_a(0.1s)$ y $S_a(1.0s)$.

MODELO	MDE	K	EDR
PGA			
ASK13	1.27	1.04	1.319
CB13	1.08	1.05	1.126
CY13	1.38	1.21	1.67
BSSA13	1.60	1.29	2.062
ID13	2.07	1.29	2.656
0.1 s			
ASK13	1.34	1.04	1.399
CB13	1.12	1.07	1.202
CY13	1.94	1.37	2.66
BSSA13	2.28	1.48	3.381
I13	1.83	1.26	2.303
1.0 s			
ASK13	1.19	1.09	1.294
CB13	1.69	1.30	2.188
CY13	0.98	1.04	1.03
BSSA13	1.15	1.14	1.307
I13	2.30	1.40	3.211

Figura 4.17. Distribución de valores de los indicadores MDE, K y EDR para los cinco modelos de atenuación calibrados con el método de Kale y Akkar (2012) para PGA, $S_a(0.1s)$ y $S_a(1.0s)$.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los modelos de movimiento fuerte seleccionados para el cálculo de peligrosidad, por presentar un mejor ajuste con datos locales, son los de Abrahamson y Silva et. al (2013) y Campbell y Bozorgnia et. al (2013). Otra razón para seleccionar estos modelos, es que son los que toman en cuenta un mayor número de parámetros de la fuente en su formulación, tal como la geometría y mecanismo focal de ruptura, lo que los hace óptimos para la caracterización de las fallas como fuentes independientes en la aplicación del método híbrido de zonas y fallas (MHZF).

Además de estos modelos, se ha seleccionado para el cálculo el modelo propio de Ruiz et al. (2012) desarrollado con datos acelerométricos locales de la red del IGN. Éste modelo sólo es válido para magnitudes inferiores a M_w 5.5, por lo que será complementado con el modelo de Akkar y Bommer B10 para magnitudes mayores a este valor. Este último modelo fue desarrollado especialmente para su aplicación en Europa, la región del Mediterráneo y Oriente medio, razón por la cual ha sido seleccionado en este caso para complementar el modelo propio de España.

Éstos modelos se combinarán en el árbol lógico formulado para los cálculos de peligrosidad (*apartado 4.4.2*), con igual ponderación. A continuación se presenta un breve descripción de los mismos.

- Modelo de Campbell y Bozorgnia 2013 (CB13)

Este modelo consiste en una nueva versión del modelo publicado por los mismos autores en el año 2008, como parte de los modelos de nueva generación (NGA). Al igual que en la versión anterior, el modelo nuevo incluye parámetros referentes a la magnitud, la atenuación geométrica, el mecanismo focal, el efecto hanging-wall y la respuesta lineal y no lineal del efecto de sitio. También se han añadido nuevos términos y variables, incluyendo un nuevo efecto de hanging-wall y las variables de profundidad hipocentro (Z_{hyp}), buzamiento (dip) y una regionalización de la atenuación anelástica.

Las características de la fuente sísmica vienen definidas por la magnitud (M_w), la profundidad a la parte superior de la ruptura (Z_{tor}), el mecanismo focal, el buzamiento (dip) y el ancho del plano de ruptura (W).

La distancia fuente-emplazamiento se define por medio de la distancia más cercana al plano de ruptura (R_{rup}), la distancia R_{jb} y la distancia R_x . El efecto de sitio es incluido por medio de la V_{s30} y la profundidad del sedimento ($Z_{2.5}$).

- Modelo de Abrahamson et al. 2013 (ASK13)

Este modelo, desarrollado por Abrahamson, Silva y Kamai, consiste en la actualización del modelo Abrahamson et al. 2008, y al igual que el modelo de CB13, forma parte de la actualización de los modelos de nueva generación NGA-West. En este modelo la fuente sísmica se caracteriza con 7 parámetros: la magnitud (M_w), la profundidad a la parte superior de la ruptura (Z_{tor}), el mecanismo focal, un identificador de réplicas (Fas), mediante la definición de dos clases dependientes de la distancia al centroide Joyner-Boore (CR_{jb}) (Wooddell y Abrahamson 2012) y dos parámetros adicionales de fuente, el buzamiento (dip) y la anchura del plano de ruptura (W), en los casos que incluyen el efecto hanging-wall.

La distancia viene definida por la distancia más cercana al plano de ruptura (R_{rup}), pero también se incluyen cuatro medidas adicionales de distancia, (R_{jb} , R_x , R_y , R_{yo}). Estas distancias se usan para modelar la atenuación en el efecto hanging-wall.

Este modelo incluye una regionalización para largas distancias y valor de V_{s30} en California, Japón, China y Taiwán. La desviación estándar depende de la magnitud, por lo que las magnitudes bajas conllevan una mayor desviación.

- Modelo de Ruiz et al. (2012)

Este modelo fue desarrollado dentro del proyecto para la creación del nuevo Mapa de Peligrosidad sísmica de España para la actualización de la norma sismorresistente española, en el año 2012 (Proyecto Oppel). Para la formulación de este modelo se utilizaron los registros de la base de datos acelerométrica de España del Instituto Geográfico Nacional. Los parámetros que utiliza el modelo para definir la fuente son la magnitud y la distancia R_x . Debido a las limitaciones de los registros observados en la base de datos, este modelo sólo puede ser aplicado a magnitudes menores a M_w 5.5, por lo que para magnitudes mayores a esta debe ser combinado con otro modelo foráneo. El modelo cuantifica la variabilidad de los datos mediante una desviación estándar.

4.3.4 Cuantificación del efecto local

Para cuantificar el efecto local se ha realizado una clasificación de suelos a partir de los modelos de estructura V_s y velocidades V_{s30} obtenidos en diferentes puntos de la ciudad de Lorca por Navarro et. al (2012, 2013). Estas velocidades han sido interpoladas para obtener un mapa de velocidades V_{s30} para toda la ciudad.

Los modelos Vs fueron obtenidos a través de la aplicación de técnicas SPAC, y posteriormente validados con la técnica MASW (Martinez-Pagan et. al, 2012, 2013), dando como resultado valores similares, tanto de velocidades, como de aceleraciones PGA simuladas (Figura 4.19 y Tabla 4-23).

La Figura 4.18 muestra el perfil geológico y geotécnico utilizado por García-Jerez et al. (2007) y Navarro et. al. (2013), para establecer el modelo Vs teórico inicial al aplicar las técnicas SPAC y obtener valores de Vs₃₀ más precisos, ya que esta precisión depende de lo bien que se conozca el espesor de las formaciones geológicas a ponderar, permitiendo predecir la estructura del suelo en sitios donde no existen medidas SPAC (Alcala, et. al, 2012).

Figura 4.18. Perfil geológico deducido de la cartografía geológica a escala 1:10.000, datos geotécnicos, sondeos eléctricos verticales, perfiles sísmicos de refracción y ensayos SPAC junto a los con los modelos de VS (m s⁻¹) obtenidos mediante ensayos SPAC en ciudad de Lorca. Fuente: Alcalá et al, 2012.

Figura 4.19. Sitios de la ciudad de Lorca donde se realizaron los estudios de SPAC (izq.) y de MASW (der.). Fuente: Navarro et. al (2013) y Martinez-Pagan (2013).

Tabla 4-23. Comparación de valores de Vs30 obtenidos mediante el método SPAC y el método MASW en el Recinto Ferial de Lorca y el barrio de la Viña en ciudad de Lorca. Figuras: Curvas de dispersión y perfiles de velocidades Vs obtenidos y validados con técnicas SPAC y MASW en dos estaciones de ciudad de Lorca.

- Factores de amplificación del terreno

De cara a identificar los factores de amplificación, se estableció una correspondencia entre las V_{s30} determinadas en Lorca con los rangos de valores propuestos en la clasificación del NEHRP (*National Earthquake Hazards Reduction Program*, 2009) para diferentes clases de suelo. Tal como se mencionó en el *Apartado 3.5.3*, esta clasificación diferencia cinco clases, desde roca dura a depósitos sedimentarios, caracterizándolos por su valor de V_{s30} . A la vez, asigna a cada tipo de suelo factores de amplificación de acuerdo a funciones de transferencias estandarizadas a nivel internacional, sobre el corto y largo periodo del movimiento.

Los factores de amplificación del NEHRP (2009) adoptados para el estudio son los mostrados en la Tabla 3 del *Apartado 3.5.3*. Éstos dependen del valor de aceleración de entrada (en roca), considerando la no linealidad del efecto local.

Los suelos encontrados en Lorca, de acuerdo a la clasificación del NEHRP, son de tipo B, C, D y E, distribuidos de manera heterogénea, correspondientes a velocidades V_{s30} que varían desde los 180 m/s a 800 m/s.

La Figura 4.20 muestra el mapa de velocidades de V_{s30} y su correspondencia con las clases de suelo del NEHRP.

Figura 4.20. Mapa de velocidades de Vs30 en ciudad de Lorca y su correspondiente clase de suelo según la clasificación del NEHRP (2009).

4.4 ESPECIFICACIONES DE CÁLCULO

4.4.1 Estimación de la peligrosidad sísmica en roca

El cálculo de peligrosidad se propone desde dos perspectivas: probabilista y determinista, integrando en ambos casos los resultados de la modelización de los efectos fuente, propagación y suelo. En el presente capítulo se presenta la aplicación y resultados del cálculo probabilista de la peligrosidad; los sismos de control que se obtengan de la desagregación de la peligrosidad, se caracterizarán de manera determinista en los capítulos posteriores.

La peligrosidad sísmica se estimará en términos de los siguientes parámetros de movimiento: aceleración pico (*PGA*) y aceleraciones espectrales *S_a*, referentes a 10 periodos estructurales $T = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, \text{ y } 2.0$ segundos, todas ellas expresadas en g. Estas aceleraciones se estiman con probabilidad de excedencia del 10% en 50 años (periodo de retorno PR 475 años) y 5% en 50 años (PR 975 años).

El cálculo se ha efectuado en una malla de puntos compuesta por 75x70 nodos, separados en 0.01 grados de latitud y longitud, respectivamente. La malla está encuadrada en un polígono limitado por la latitud 37.4N y la longitud 2.05W (Figura 4.21), cubriendo la ciudad de Lorca completamente.

Figura 4.21. Malla de cálculo para el que efectuará el cálculo de la peligrosidad

La peligrosidad sísmica se calculará obteniendo la tasa anual de excedencia para varios niveles de aceleración de los parámetros de movimiento antes mencionados, concretamente para veinte valores equiespaciados en escala logarítmica en los rangos mostrados en la siguiente tabla (Tabla 4-24):

Tabla 4-24. Niveles de aceleración para los que se realizará el cálculo de la tasa anual de excedencia, en cada ordenada espectral.

T	Rango de aceleración (g)
PGA	0.02 - 2.0
0.10	0.03 - 3.0
0.20	0.03 - 3.0
0.30	0.03 - 3.0
0.40	0.03 - 3.0
0.50	0.03 - 3.0
0.75	0.02 - 2.0
1.00	0.02 - 2.0
1.50	0.02 - 2.0
2.00	0.01 - 1.0

Las aceleraciones resultantes serán estimadas en emplazamientos genéricos para suelo tipo roca o suelo duro ($V_{s30} = 760$ m/s), considerando que en dichos emplazamientos debe calcularse posteriormente el efecto local atendiendo a esta aceleración de referencia.

Se considerará la variabilidad aleatoria del modelo de movimiento fuerte hasta un máximo de 3 desviaciones estándar ($\epsilon=3$), por suponer que dicho truncamiento contempla sobradamente la aleatoriedad del movimiento asociado al modelo de predicción.

- Programa de cálculo

El programa utilizado para desarrollar el cálculo probabilista de la peligrosidad es el Software libre CRISIS2012, desarrollado por Ordaz y colaboradores en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Ordaz et al., 2014).

Este programa resuelve la integral de peligrosidad numéricamente, discretizando las funciones de probabilidad en intervalos de magnitud y distancias finitos. Además, el programa permite incorporar fuentes *tipo falla*, por lo que constituye una herramienta óptima para la aplicación de los dos métodos de la modelización de fuentes seleccionados, MCZ y MHZF.

La geometría y parámetros de las fuentes han sido modelizados en el programa de la siguiente manera:

- Zonas sismogénicas: polígonos como planos horizontales a 5km de profundidad. Los parámetros introducidos al programa para el modelo de recurrencia de GR modificado son: la tasa de sismicidad acumulada para la magnitud mínima de corte, el parámetro β con su correspondiente incertidumbre, la magnitud mínima de corte y la magnitud máxima esperada, con su desviación estándar.

- Fallas: planos con inclinación y profundidad correspondiente a las coordenadas de cada falla, calculadas previamente a partir de su geometría. Para introducir los parámetros de estas fallas al programa, se utiliza el modelo poissoniano genérico que permite introducir las tasas simples de sismicidad de las fuentes en función de la magnitud, para los intervalos de magnitud que se deseen. En este caso, se han introducido las tasas correspondientes al modelo de recurrencia GR modificado, a cada 0.1 grados de magnitud.

4.4.2 Árbol lógico

Para cuantificar las incertidumbres epistemológicas inherentes a los modelos utilizados, se realizó un árbol lógico para incluir las diferentes combinaciones entre los métodos de modelización de la fuente con sus correspondientes zonificaciones, las tasas de deslizamiento utilizadas y los modelos de atenuación elegidos y descritos en el *apartado 2.3.4*.

El árbol consta de un total de 4 nodos y 9 ramas (Figura 4.22). El primer nodo del árbol se asocia al método de cálculo y se divide en dos ramas, ponderadas de igual manera; una para el método MHZF y otra para el método MCZ, el siguiente nodo corresponde a las zonificaciones eligidas para estos métodos, GM10 y GM12, respectivamente. El tercer nodo corresponde a la tasa de deslizamiento, que para el caso del modelo MHZF se divide en dos ramas, una con las tasas del QAFI (paleosismicidad) y otra para las tasas obtenidas con técnicas geodésicas, con un peso de 0.5 cada una. El último nodo corresponde a los modelos de atenuación de CB13, ASK13 y AB10MP12.

Figura 4.22. Árbol lógico generado para el cálculo de peligrosidad probabilista (PSHA).

4.5 RESULTADOS DE PELIGROSIDAD EN ROCA

Los resultados de cálculo de la peligrosidad, permiten caracterizar el movimiento esperado por sismos futuros con una cierta probabilidad de excedencia, en función del periodo de retorno asumido. Con el fin de caracterizar de forma completa el movimiento derivado del análisis de amenaza, se presentan los siguientes resultados, tanto para emplazamientos genéricos en roca como incluyendo el efecto local del suelo:

- Mapas del movimiento esperado con probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años (PR de 475 años), en términos de aceleraciones pico, PGA y espectrales de corto periodo S_a (0.1 s) y largo periodo S_A (1 s).
- Mapas del movimiento esperado con probabilidad de excedencia de 5 % en 50 años (PR de 975 años), en términos de aceleraciones pico, PGA y espectrales de corto periodo S_a (0.1 s) y largo periodo S_A (1 s).
- Espectros de peligrosidad uniforme UHS en todos los barrios de la ciudad de Lorca, para periodos de retorno de 475 y 975 años.

4.5.1 Mapas de aceleración en roca

Los espectros de respuesta y mapas resultantes reflejan el movimiento esperado para los periodos de retorno de 475 años y 975 años, estimados primeramente en roca, para las dos metodologías consideradas en esta aplicación: la metodología clásica zonifica (MCZ) y la metodología híbrida (MHZF).

En primer lugar, para facilitar un análisis de sensibilidad de diferentes opciones de cálculo en los resultados, se muestran desglosadamente los resultados obtenidos para cada rama del árbol lógico, en cuanto a la metodología de modelización de la fuente y modelos de atenuación aplicados. La finalidad de este análisis es evaluar la influencia de la modelización de fallas como fuentes independientes en el cálculo de la peligrosidad y la variación de resultados por la selección de GMPE's.

La Figura 4.23 muestra los resultados de aceleraciones pico PGA en roca, obtenidos del cálculo realizado con el método híbrido de zonas y fallas (MHZF), tomando en cuenta las tasas de deslizamiento de las fallas medidas con técnicas geodésicas, y según los tres modelos de atenuación empleados. Los resultados de los tres modelos presentan la misma tendencia, con los mayores valores entorno al sistema de fallas de Alhama de Murcia, seguidos por la falla Carrascoy, atenuándose rápidamente en

las zonas aledañas. Las mayores aceleraciones fueron obtenidas según el modelo de CB13, llegando a alcanzar un valor de 0.62g entorno al sistema de fallas de Alhama de Murcia, y decreciendo en los alrededores hasta un valor de 0.12g. El modelo de ASK13 muestra la misma distribución, pero alcanzando un valor máximo de 0.49g sobre dichas fallas. La combinación del modelo propio de Ruiz (2012) y Akkar y Bommer (2010) (AB10MP12) muestra un valor máximo de 0.45 g, y distribución muy similar a la de ASK13.

La Figura 4.24 muestra los resultados obtenidos con la misma metodología, MHZF, pero con las tasas de deslizamiento publicadas por QAFI, estimadas a través de estudios de paleosismicidad. De igual modo que en el caso anterior, los tres modelos presentan la misma distribución, con los mayores valores de aceleración en el entorno de las fallas de Alhama de Murcia y de Carrascoy. En este caso, las aceleraciones entorno a la falla de Carrascoy son similares a las de los dos primeros segmentos de la falla de Alhama de Murcia, ya que presentan tasas de deslizamiento parecidas. El mayor valor de aceleración se obtiene según el modelo de CB13, alcanzando un valor de 0.40g y decreciendo hasta 0.12g. Los modelos de ASK13 y AB10MP12 alcanzan valores de 0.33g y 0.35g, respectivamente.

La Figura 4.25 muestra los resultados de la aplicación del método clásico zonificado (MCZ). En este caso se observa como, para los tres modelos de atenuación empleados, las aceleraciones se distribuyen de manera más homogénea en el entorno de fallas y sus alrededores. Los mayores valores de aceleraciones se observan en la zona comprendida entre la falla de Palomares, Los Tollos y Carrascoy, y el sistema de fallas de Crevillente, con el sistema de fallas de Alhama de Murcia en medio. Todos estos sistemas de fallas están contenidos en la zona 55 de la zonificación de García-Mayordomo (2012). La máxima aceleración obtenida según el modelo de CB13, presenta un valor de 0.26g, mientras que los otros dos modelos proporcionan un valor máximo de aceleración de 0.22g.

Para facilitar la comparación entre estos resultados, se ha representado el cociente entre los obtenidos según la metodología híbrida de zonas y fallas con las tasas de deslizamiento geodésicas y los deducidos con las tasas de deslizamientos del QAFI (paleosismicidad). Esta comparación se muestra en la Figura 4.26(a). Como se puede observar, los resultados obtenidos con las tasas de deslizamiento geodésicas llegan a duplicar los valores de aceleración entorno al segmento de falla de Alhama de Murcia (3/4), correspondiente al segmento Totana-Alhama. Esto se debe a que según la QAFI, este segmento de falla era asísmico, es decir, tenía una tasa de deslizamiento nula, mientras que a través de técnicas geodésicas, a este segmento se le ha asignado una tasa de deslizamiento significativa de 1 mm/año. Las dos primeros segmentos de este mismo sistema de fallas, correspondientes a Goñar-Lorca y Lorca-Totana, también presentan valores de aceleración bastante más elevados según las tasas geodésicas que con las tasas del QAFI. Las primeras son hasta tres veces mayores que las segundas,

pasando de valores de 0.3 y 05 mm/año (QAFI) a valores de 1.35 mm/año (Geodesia).

Finalmente, en la Figura 4.26(b) se muestra un mapa representativo del cociente de los resultados de aceleración obtenidos según el método híbrido de zonas y fallas (MHZF) y según el método clásico zonificado (MCZ). Los resultados del método híbrido se obtuvieron ponderando con igual peso las tasas geodésicas y las tasas de paleosismicidad. Como se muestra en la figura, las aceleraciones en el entorno de las fallas de Alhama de Murcia y Carrascoy llegan a duplicarse según el método MHZF, con respecto a las obtenidas aplicando el método MCZ. La razón entre estos dos métodos pone de manifiesto que al incluir las fallas como fuentes independientes en el cálculo, las aceleraciones esperadas en el entorno de las mismas son mayores que las aceleraciones esperadas al distribuir el potencial sísmico en una zona mayor. Este hecho corrobora lo que se ha venido observando en diversos terremotos ocurridos, entre ellos el de Lorca de 2011, en que las aceleraciones llegaron a triplicarse en el entorno de la falla, atenuándose rápidamente con la distancia. Como se puede observar en la figura, el método zonificado, al distribuir la peligrosidad de manera más uniforme, muestra valores ligeramente mayores que el MHZF en las áreas aledañas al entorno de estas fallas.

Figura 4.23. Resultados de peligrosidad sísmica en términos de aceleraciones PGA (g), para el cálculo realizado con el método híbrido de zonas y fallas (MHZF) y tasas de deslizamiento medidas con técnicas geodésicas, según los modelos de atenuación de a) Abrahamson y Silva (2013), b) Campbell y Bozorgnia (2013) y c) Akkar y Bommer (2010) – Ruiz (2012).

Figura 4.24. Resultados de peligrosidad sísmica en términos de aceleraciones PGA (g), para el cálculo realizado con el método híbrido de zonas y fallas (MHZF) y tasas de deslizamiento del QAFI (paleosismicidad), según los modelos de atenuación de a) Abrahamson y Silva (2013), b) Campbell y Bozorgnia (2013) y c) Akkar y Bommer (2010) – Ruiz (2012).

Figura 4.25. Resultados de peligrosidad sísmica en términos de aceleraciones PGA (g), para el cálculo realizado con el método clásico zonificado (MCZ), según los modelos de atenuación de a) Abrahamson y Silva (2013), b) Campbell y Bozorgnia (2013) y c) Akkar y Bommer (2010) – Ruiz (2012).

Figura 4.26. Arriba: mapa comparativo mostrando la razón de las aceleraciones PGA obtenidas según el método MHZF, aplicado con las tasas de deslizamiento medidas con técnicas geodésicas, entre los resultados obtenidos con el mismo método aplicado con tasas de deslizamiento del QAFI (paleosismicidad). Abajo: mapa comparativo mostrando la razón de las aceleraciones PGA obtenidas según el método MHZF entre las obtenidas con el método MCZ.

Una vez obtenidos los resultados de cada rama del árbol lógico, se procedió a combinar los mismos con los pesos establecidos, mostrados en la Figura 4.22. Así pues, se han ponderado de igual manera los resultados de aceleraciones obtenidos según el método MHZF y el método MCZ, dando como resultado las aceleraciones representadas en los mapas que se mostrarán a continuación.

La Figura 4.27 representa las aceleraciones pico (PGA) obtenidas para un periodo de retorno de 475 años (arriba) y para un periodo de retorno de 975 años (abajo), en emplazamientos genéricos en roca de la ciudad de Lorca. Para el primer caso se esperan aceleraciones, sin tener en cuenta el efecto local, entre 0.31 g y 0.33 g. Para el periodo de retorno de 975 años, se esperan aceleraciones de 0.41 g a 0.44 g.

La Figura 4.28 muestra las aceleraciones correspondientes a la ordenada espectral de $S_a(0.1s)$. Para el caso de 475 años (arriba), las aceleraciones esperadas alcanzan valores de 0.67 g a 0.71 g, y para el caso de 975 años (abajo), se esperan valores de 0.90 g a 0.94 g.

Las aceleraciones esperadas en roca para la ordenada espectral de $S_a(1s)$ se muestran en la Figura 4.29. En la parte superior se muestran las aceleraciones obtenidas para el periodo de retorno de 475 años, con valores de 0.20 g y 0.21 g, mientras que en la parte inferior se muestran las aceleraciones para el periodo de retorno de 975 años, con valores de 0.29 g a 0.31 g.

Figura 4.27. Mapa de peligrosidad sísmica en términos de PGA (g) en roca, para un periodo de retorno de 475 años (arriba) y 975 años (abajo).

Figura 4.28. Mapa de peligrosidad sísmica para $S_a(0.1 \text{ s})$ (g) en roca, para un periodo de retorno de 475 años (arriba) y 975 años (abajo).

Figura 4.29. Mapa de peligrosidad sísmica para $Sa(1s)$ (g) en roca, para un periodo de retorno de 475 años (arriba) y 975 años (abajo).

4.5.2 Mapas de aceleración en suelo

Integrando el efecto local, los mapas resultantes reflejan el movimiento esperado para los periodos de retorno de 475 años y 975 años considerando el tipo de suelo en cada punto del territorio del núcleo urbano de Lorca.

En la Figura 4.30 se muestran los mapas con la distribución de aceleraciones pico PGA esperadas en la ciudad, para el caso del periodo de retorno de 475 años y de 975 años. Como se puede observar en el mapa, para el caso de 475 años se esperan aceleraciones que varían de 0.31 g hasta 0.39 g, debido al efecto de amplificación de los suelos más blandos. La mayor parte de la ciudad presenta un tipo de suelo C, según la clasificación de suelos del NEHRP, donde se esperan aceleraciones entre 0.33 g y 0.35 g. Los mayores valores se observan al noroeste de la ciudad, debido a que es la zona más próxima a los segmentos de fallas de Alhama de Murcia. También se observan valores más elevados entorno a la cuenca del río Guadalentín, debido a que se corresponde con el tipo de suelo D del NEHRP, más blando que el suelo en el resto de la ciudad, por lo que el efecto de sitio, en combinación con el movimiento de entrada en roca, genera una amplificación de las aceleraciones en éstas áreas. Para el periodo de retorno de 975 años, la zona entorno a la cuenca del río Guadalentín sigue siendo la que presenta los valores de aceleraciones más elevados, junto a ciertas zonas de la ciudad que presentan el mismo tipo de suelo. Sin embargo, se observa también un aumento en las aceleraciones esperadas en toda la mitad noroeste de la ciudad, desde el barrio de La Viña hasta la punta noreste de la ciudad, coincidente con el barrio de Los Ángeles, alcanzándose valores de aceleración de 0.43 a 0.45 g.

Las aceleraciones esperadas para la ordenada espectral de $S_a(0.1s)$, incluyendo el efecto local del suelo, se muestran en la Figura 4.31. Como se puede observar, las aceleraciones resultantes para el periodo de retorno de 475 años varían desde 0.68 g hasta 0.91 g, siguiendo una distribución similar al caso de las aceleraciones PGA, presentando los valores mayores en la zona noroeste de la ciudad y en las áreas con tipo de suelo D. Barrios como el de La Viña o el Barrio de San José, muestran una diferencia de aceleraciones desde 0.68 g hasta 0.87 g, debido a la presencia de diferentes tipos de suelo en éstas áreas, desde suelo tipo B, correspondiente a roca, hasta suelo tipo D.

La Figura 4.32 muestra las aceleraciones en suelo correspondientes a la ordenada espectral $S_a(1s)$. Para el caso de 475 años, se esperan aceleraciones entre los 0.20 g y los 0.67 g, debido a la influencia del terreno. La mayor parte de la ciudad presenta aceleraciones entre 0.40 y 0.50 g. Para el periodo de retorno de 975 años, las aceleraciones varían de 0.3g hasta 0.85 g, encontrándose la mayor parte de valores entre 0.45 y 0.6 g, en la cara noroeste de la ciudad.

Figura 4.30. Mapa de peligrosidad sísmica en términos de PGA (g) en incluyendo el efecto local, para un periodo de retorno de 475 años (arriba) y 975 años (abajo).

Figura 4.31. Mapa de peligrosidad sísmica en términos de $S_a(0.1s)$ (g) incluyendo el efecto local, para un periodo de retorno de 475 años (arriba) y 975 años (abajo).

Figura 4.32. Mapa de peligrosidad sísmica en términos de $S_a(1s)$ (g) incluyendo el efecto local, para un periodo de retorno de 475 años (arriba) y 975 años (abajo).

4.5.3 Espectros resultantes

A continuación, se muestran los espectros de respuesta obtenidos en los diferentes barrios de la ciudad de Lorca como resultado del estudio probabilista para periodos de retorno de 475 años y para 975 años. Se muestra también su comparación con el correspondiente espectro de la NSCE-02, calculado según los parámetros de la normativa para estos periodos de retorno y para cada tipo de suelo.

La Figura 4.33, Figura 4.34, Figura 4.35 y Figura 4.36 muestran los espectros obtenidos en los barrios con clases de suelo B, C, D y E, según la clasificación del NEHRP, y suelo I, II, III y IV según la NSCE-02, respectivamente, para el periodo de retorno de 475 años. En todos los casos se observa que los espectros resultantes del estudio de peligrosidad probabilista para la ciudad de Lorca quedan por encima del espectro actual de la norma NCSE-02 para esta región.

Figura 4.33. Espectros de respuesta estimados en diferentes barrios de ciudad de Lorca con clase de suelo B (según clasificación del NEHRP, Suelo I según la NSCE-02), para un periodo de retorno de 475 años, y su comparación con el espectro de la norma NSCE-02 para el mismo tipo de suelo.

Figura 4.34. Espectros de respuesta estimados en diferentes barrios de ciudad de Lorca con clase de suelo C (según clasificación del NEHRP, Suelo II según la NSCE-02), para un periodo de retorno de 475 años, y su comparación con el espectro de la norma NSCE-02 para el mismo tipo de suelo.

Figura 4.35. Espectros de respuesta estimados en diferentes barrios de ciudad de Lorca con clase de suelo D (según clasificación del NEHRP, Suelo III según la NSCE-02), para un periodo de retorno de 475 años, y su comparación con el espectro de la norma NSCE-02 para el mismo tipo de suelo.

Figura 4.36. Espectro de respuesta estimado en el barrio de San Fernando de ciudad de Lorca, con clase de suelo E (según clasificación del NEHRP, Suelo IV según la NSCE-02), para un periodo de retorno de 475 años, y su comparación con el espectro de la norma NSCE-02 para el mismo tipo de suelo.

Por otra parte, la Figura 4.41, Figura 4.38, Figura 4.39 y Figura 4.40 muestran los espectros obtenidos en los barrios con clases de suelo B, C, D y E, según la clasificación del NEHRP, y suelo I, II, III y IV según la NSCE-02, respectivamente, para el periodo de retorno de 975 años, en comparación con el espectro de respuesta establecido en esta normativa para las edificaciones de importancia especial, las cuales se corresponden con este periodo de retorno. Al igual que en el caso del periodo de retorno de 475 años, se observa que los espectros resultantes de este estudio, para un periodo de retorno de 975 años, son en todos los casos mucho más elevados que el espectro actual de la norma NCSE-02 para esta población.

Figura 4.37. Espectros de respuesta estimados en diferentes barrios de ciudad de Lorca con clase de suelo B (según clasificación del NEHRP, Suelo I según la NSCE-02), para un periodo de retorno de 975 años, y su comparación con el espectro de la norma NSCE-02 para el mismo tipo de suelo.

Figura 4.38. Espectros de respuesta estimados en diferentes barrios de ciudad de Lorca con clase de suelo C (según clasificación del NEHRP, Suelo II según la NSCE-02), para un periodo de retorno de 975 años, y su comparación con el espectro de la norma NSCE-02 para el mismo tipo de suelo.

Figura 4.39. Espectros de respuesta estimados en diferentes barrios de ciudad de Lorca con clase de suelo D (según clasificación del NEHRP, Suelo III según la NSCE-02), para un periodo de retorno de 975 años, y su comparación con el espectro de la norma NSCE-02 para el mismo tipo de suelo.

Figura 4.40. Espectro de respuesta estimado en el barrio de San Fernando de ciudad de Lorca, con clase de suelo E (según clasificación del NEHRP, Suelo IV según la NSCE-02), para un periodo de retorno de 975 años, y su comparación con el espectro de la norma NSCE-02 para el mismo tipo de suelo.

4.5.4 Desagregación

Se ha realizado la desagregación para los movimientos objeto dados por los valores de PGA y para las aceleraciones espectrales SA (1s) resultantes del análisis previo de peligrosidad, con el fin de encontrar los sismos que más contribuyen al corto y largo periodo del movimiento. Esta desagregación fue realizada para cada una de las ramas consideradas en el árbol lógico formulado para el cálculo.

La Tabla 4-25 muestra los pares de magnitud y distancia obtenidos con mayor contribución a la peligrosidad para las dos metodologías utilizadas y los tres modelos de atenuación aplicados.

Tabla 4-25. Pares (M,R) obtenidos según las diferentes ramas de cálculo del árbol lógico de peligrosidad sísmica.

MHZF (GEODESIA)				
T	PR	CB13	ASK13	AB10MP12
PGA	475	(6.50-6.75)(10-20km)	(6.50-6.75)(10-20km)	(5.50-5.75)(0-10km)
1S	475	(6.50-6.75)(10-20km)	(6.50-6.75)(10-20km)	(6.00-6.25)(0-10km)
PGA	975	(6.50-6.75)(10-20km)	(6.50-6.75)(10-20km)	(5.50-5.75)(0-10km)
1S	975	(6.50-6.75)(10-20km)	(6.50-6.75)(10-20km)	(6.50-6.75)(10-20km)
MHZF (PALEOSISMICIDAD)				
T	PR	CB13	ASK13	AB10MP12
PGA	475	(5.50-5.75)(0-10km)	(5.00-5.25)(0-10km)	(5.50-5.75)(0-10km)
1S	475	(5.50-5.75)(0-10km)	(6.50-6.75)(10-20km)	(5.50-5.75)(0-10km)
PGA	975	(6.50-6.75)(10-20km)	(5.00-5.25)(0-10km)	(5.50-5.75)(0-10km)
1S	975	(6.50-6.75)(10-20km)	(6.50-6.75)(10-20km)	(5.50-5.75)(0-10km)
MCZ				
T	PR	CB13	ASK13	AB10MP12
PGA	475	(5.25-5.50)(0-10km)	(4.75-5.00)(0-10km)	(4.75-5.00)(0-10km)
1S	475	(5.50-5.75)(10-20km)	(6.25-6.50)(10-20km)	(6.25-6.50)(10-20km)
PGA	975	(5.25-5.50)(0-10km)	(5.00-5.25)(0-10km)	(4.75-5.00)(0-10km)
1S	975	(6.25-6.50)(10-20km)	(6.25-6.50)(10-20km)	(6.25-6.50)(10-20km)

La Figura 4.41 muestra los resultados de desagregación para los movimientos objeto dados por los valores de PGA y Sa (1s) para periodos de retorno de 475 años y 975 años, para una de las ramas del árbol lógico generado, dada por el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (ASK13), con la metodología MHZF y las tasas de deslizamiento geodésicas; la Figura 4.42 muestra los resultados para el mismo modelo de atenuación y metodología, con tasas de deslizamiento del QAFI, y la Figura 4.43 los resultados para el mismo modelo de atenuación, según el método MCZ.

Figura 4.41. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la PGA en un periodo de retorno de 475 años (arriba izq.), de 975 años (abajo izq.), y para Sa(1s) en 475 años (arriba der.) y 975 años (abajo der.) según la rama de peligrosidad calculada con el método MHZF, tasas de deslizamiento geodésicos y el modelo de atenuación ASK13..

Figura 4.42. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la PGA en un periodo de retorno de 475 años (arriba izq.), de 975 años (abajo izq.), y para Sa(1s) en 475 años (arriba der.) y 975 años (abajo der.) según la rama de peligrosidad calculada con el método MHZF, tasas de deslizamiento del QAFI (paleosismicidad) y el modelo de atenuación ASK13.

Figura 4.43. Resultado de desagregación del cálculo probabilista para el movimiento objeto dado por la PGA en un periodo de retorno de 475 años (arriba izq.), de 955 años (abajo izq.), y para Sa(1s) en 475 años (arriba der.) y 975 años (abajo der.) según la rama de peligrosidad calculada con el método MCZ y el modelo de atenuación ASK13.

En base a los resultados obtenidos se han establecido como sismos de control para la definición de los escenarios sísmicos a evaluar de manera determinista, un sismo de Mw 5.2 a una distancia entre 0 -10 km del casco urbano de Lorca, asociado al periodo de retorno de 475 años y considerado como el **sismo más probable**, y por otra parte, un sismo de Mw 6.5 a una distancia de 10 a 20 km de la ciudad, asociado al periodo de retorno de 975 años, y considerado como el **sismo extremo**.

Tras el análisis de la tectónica y sismicidad en el entorno de Lorca, el sismo de Mw 5.2 será asociado a la falla de Alhama de Murcia, en el segundo segmento (2/4) de la misma, comprendido entre Lorca y Totana, y se situará de 3-5 km de distancia epicentral del centro de la ciudad de Lorca. El sismo de Mw 6.5 será asociado a la falla de Alhama de Murcia, en el primer segmento, Goñar-Lorca, y se situará a unos 15 km de distancia epicentral del centro de la ciudad.

La Tabla 4-26 muestra un resumen de los pares (M, R) asociados a los sismos de control obtenidos y en la Figura 4.44 se identifican los correspondientes escenarios sísmicos.

Tabla 4-26 Resumen de los sismos de control obtenidos por desagregación para un periodo de retorno de 475 años (sismo probable) y para 975 años (sismo extremo).

SISMO DE CONTROL	PR (AÑOS)	Mw	R	FALLA
Sismo más probable	475	5.2	3-5 km	Alhama de Murcia, segmento Lorca-Totana
Sismo extremo	975	6.5	15 km	Alhama de Murcia, segmento Goñar-Lorca

Figura 4.44. Escenarios sísmicos definidos de acuerdo a los sismos de control obtenidos de la desagregación y las fallas a las que han sido asociados. El círculo punteado en verde indica el radio de 10 km del centro de la ciudad de Lorca, dentro del cual se ubica el sismo más probable que define el primer escenario, Mw5.2. El círculo punteado en azul, indica el radio de 10 a 20 km de la ciudad, dentro del cual se ubicará el sismo extremo, asociado al periodo de retorno de 975 años, Mw 6.5.

CAPÍTULO 5

SIMULACIÓN DEL ESCENARIO DE DAÑO ASOCIADO AL SISMO OBTENIDO PARA PR475

5.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo desarrolla la caracterización del escenario obtenido como más probable de la desagregación realizada a partir del cálculo de peligrosidad probabilista (*apartado 4.5.4.*). Este escenario ha sido definido como el correspondiente a un sismo de magnitud Mw 5.2, localizado de 0 a 10 km del centro de la ciudad de Lorca y está asociado a un periodo de retorno de 475 años.

Dado que este movimiento se corresponde en magnitud y distancia con el sismo ocurrido el día 11 de mayo de 2011 en la ciudad de Lorca, se realizará una simulación del mismo para su posterior comparación con el espectro de respuesta real registrado durante el terremoto, y los daños observados, consecuentes a dicho movimiento.

Los resultados del estudio de este escenario híbrido, probabilista –determinista, serán mostrados a través de una colección de mapas representativos del riesgo, que mostrarán el grado de daño de los edificios residenciales, a la vez que las pérdidas humanas y económicas derivadas del daño esperado en las edificaciones.

En el primer apartado se muestran las características del sismo y de la falla a la que ha sido asociado, junto a los parámetros establecidos para la modelización del plano de ruptura generado para la simulación. Seguidamente, se describen los modelos de atenuación empleados para la estimación del movimiento fuerte esperado y se exponen los espectros de respuesta obtenidos del cálculo determinista.

En el siguiente apartado se describe el procedimiento de creación de la base de datos de exposición del parque inmobiliario y población de la ciudad de Lorca, así como la correspondiente asignación de vulnerabilidad a las edificaciones expuestas.

Posteriormente, en el último apartado de este capítulo, se presentan los resultados obtenidos para los diferentes parámetros indicadores del riesgo urbano: daño en edificios y viviendas, viviendas inhabitables y personas que quedarían sin hogar, víctimas mortales y heridos, y finalmente, las pérdidas económicas asociadas a este primer escenario determinista en la ciudad de Lorca.

5.2 ESTUDIO DETERMINISTA

5.2.1 Características del terremoto

El día 11 de mayo de 2011, a las 16:47:25 horas, se registró en la Región de Murcia un sismo con magnitud Mw 5.1 – 5.2, cuyo epicentro se localizó entre 3 y 5 km dirección noreste del casco urbano de la ciudad de Lorca, siendo esta ciudad la más afectada por el movimiento generado. A pesar de su magnitud moderada, este sismo causó daños importantes y víctimas mortales, a causa de su poca profundidad, la proximidad de la ciudad a la falla, el efecto de directividad del movimiento (López-Comino, 2012) y la vulnerabilidad de las estructuras (Hermanns, 2011).

La falla que generó la ruptura es la falla de Alhama de Murcia, específicamente el segmento de la misma que va de Lorca a Totana (Martínez-Díaz, 2011; Visser y Meijninger, 2011; Boletín Geológico y Minero, vol.123/4, 2012). Es una falla de mecanismo inverso, con componente sinistral, una longitud aproximada de 20 km y una tasa de deslizamiento anual aproximada de 0.3 mm/año. Según datos de QAFIV.3, obtenidos por paleosismicidad, junto con la geometría de este segmento de falla, se podría llegar a generar una magnitud máxima de Mw 6.7 en dicho segmento, con un intervalo de recurrencia estimado de 3500 años. (Martínez-Díaz, et. al, 2012; García-Mayordomo, 2005).

El plano de ruptura asumido en este trabajo para la simulación del sismo de Mw 5.2, ha sido establecido de acuerdo a las coordenadas epicentrales y profundidades definidas por Martínez-Díaz, et al. (2012a), compatibles con las características geométricas del segmento de falla Lorca-Totana publicadas en la QAFIV.3. El área de ruptura se ha asociado a la magnitud del sismo con la ecuación de Leonard (2010).

La Tabla 5-1 muestra los parámetros de la falla y el plano de ruptura considerado para el escenario sísmico definido.

Tabla 5-1. Parámetros de la falla de Alhama de Murcia, segmento Lorca-Totana, utilizados para la simulación del escenario 1.

Magnitud (Mw)	5.2
Mecanismo	Direccional Inversa
Acimut θ	235°
Buzamiento β	55°
Deslizamiento	39°
Longitud (m)	3364.70
Anchura (m)	3041.26
Profundidad del techo de ruptura (m)	1500
Coordenada X del punto medio de la traza	616406.597
Coordenada Y del punto medio de la traza	4172132.079

La Figura 5.1 muestra el proceso de cálculo de la posición relativa del plano de ruptura con respecto al punto de cálculo, en base a las coordenadas del punto medio de la traza y los ángulos de la falla. La Tabla 5-2 muestra las coordenadas finales del plano generado y en la Figura 5.2 se puede observar una vista en planta de la localización del plano con respecto a la ubicación de la ciudad de Lorca.

Figura 5.1. Cálculo de la posición relativa del plano de ruptura de la falla con respecto al punto medio de la traza establecido y los parámetros geométricos de la falla.

Tabla 5-2. Coordenadas y profundidad del plano de ruptura generado para el sismo de Mw5.2.

ID	Coord. X (UTM)	Coord. Y (UTM)	Z
1N	618456	4174169	-1500
1S	615602	4172385	-1500
2S	615051	4173268	-3991.26
2N	617905	4175051	-3991.26

Figura 5.2. Vista en planta de la localización del plano de ruptura generado con respecto a la ciudad de Lorca (en verde).

5.2.2 Modelos de atenuación y movimiento fuerte esperado

Una vez establecida la localización y características del plano de ruptura, se procedió a la aplicación de los modelos de atenuación para la predicción del movimiento fuerte esperado correspondiente al escenario definido. Los modelos de atenuación utilizados para este cálculo fueron, en primer lugar, los modelos de Abrahamson y Silva (ASK13) y Campbell y Bozorgnia (CB13), ambos utilizados en el cálculo probabilista de la peligrosidad por ser los más completos y los que mejores resultados presentan en los análisis de residuos realizados.

Al mismo tiempo, se ha realizado el cálculo con el modelo de Chiou y Youngs (2013), debido a que este

modelo contiene un parámetro (ΔDPP) para tomar en cuenta el efecto de directividad de la fuente, aunque según los autores del modelo, para magnitudes menores a $M_w < 5.5$ este efecto se asume insignificante. Aún así, se ha tomado en cuenta este modelo puesto que presenta mejores resultados que los anteriores para largos periodos, de acuerdo a los análisis de residuos de Scherbaum (2004) y Kale&Akkar (2012).

Por último, se ha incorporado al cálculo el modelo propio de Ruiz et. al (2012), por haber sido formulado con registros de la base de datos acelerométrica de España (IGN) y cubrir un rango de magnitudexs hasta $M_w 5.5$.

Todos los modelos de atenuación han sido aplicados para obtener los valores de aceleración media, μ , y $\mu \pm \sigma$, en términos de PGA y para las ordenadas espectrales de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1, 1.5 y 2 segundos. Los espectros obtenidos constituirán la curva de demanda correspondiente a cada unidad de trabajo (edificio) de la ciudad, y los resultados de daños obtenidos de acuerdo a cada modelo serán finalmente ponderados en un árbol lógico.

- Espectros específicos resultantes.

Los valores de aceleración para PGA, 0.1 y 1 segundos, de los espectros de respuesta elástica obtenidos de la simulación del sismo $M_w 5.2$ para cada modelo de atenuación empleado, se muestran en la Tabla 5-3. Como se puede observar en la tabla, los mayores valores de aceleración se obtienen con el modelo de Chiou y Youngs (CY13), y los menores valores con el modelo propio Ruiz et al. (MP12). Los modelos muestran una media de valores entorno a los 0.23 g para PGA, excepto el modelo MP12 que muestra resultados de aceleración mucho menores, con valores de 0.1g. En el caso de $S_a (0.1s)$, la media de las aceleraciones se encuentra entorno a los 0.4 g, y para $S_a (1s)$ el promedio de aceleraciones de los cuatro modelos se encuentra entorno a los 0.15g.

Los mayores espectros de respuesta elástica obtenidos de la generación del escenario determinista para los diferentes modelos de atenuación y para los distintos tipos de suelo, según la clasificación del NEHRP, se muestran en la Figura 5.3 para los barrios con clase de suelo B, Figura 5.4 para los de clase de suelo C, Figura 5.5 para los clase de suelo D y en la Figura 5.6 para el barrio con clase de suelo E. Estos espectros constituirán el input sísmico para la estimación del daño en las edificaciones y demás parámetros de riesgo urbano.

Tabla 5-3. Valores de aceleración PGA obtenidos de la simulación del sismo Mw 5.2, para los cuatro modelos de atenuación empleados, siendo Y la aceleración media, y σ la desviación estándar del modelo

T	ASK13			CB13			CY13			MP12		
	Y	Y+ σ	Y- σ	Y	Y+ σ	Y- σ	Y	Y+ σ	Y- σ	Y	Y+ σ	Y- σ
PGA	0.2	0.42	0.1	0.18	0.29	0.11	0.24	0.46	0.13	0.08	0.23	0.02
	0.25	0.48	0.13	0.23	0.35	0.15	0.35	0.67	0.18	0.09	0.26	0.03
Sa0.1s	0.43	0.91	0.20	0.28	0.45	0.17	0.54	1.13	0.26	0.11	0.33	0.03
	0.48	1.00	0.26	0.38	0.65	0.22	0.70	1.46	0.33	0.22	0.68	0.07
Sa1.0s	0.08	0.16	0.04	0.10	0.17	0.06	0.12	0.22	0.06	0.06	0.18	0.02
	0.18	0.36	0.09	0.25	0.40	0.16	0.29	0.55	0.15	0.11	0.34	0.04

Figura 5.3. Espectros obtenidos en los barrios con clase de suelo B de ciudad de Lorca, según el modelo de a) ASK13, b) CB13, c) CY13 y d) MP12.

Simulación del escenario de daño asociado al sismo obtenido para PR 475

Figura 5.4. Espectros obtenidos en los barrios con clase de suelo C de ciudad de Lorca, según el modelo de a) ASK13, b) CB13, c) CY13 y d) MP12.

Figura 5.5. Espectros obtenidos en los barrios con clase de suelo D de ciudad de Lorca, según el modelo de a) ASK13, b) CB13, c) CY13 y d) MP12.

Figura 5.6. Espectro obtenido en la clase de suelo E de ciudad de Lorca, según el modelo de a) ASK13, b) CB13, c) CY13 y d) MP12.

5.3 EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD EN LORCA

Tras la caracterización del movimiento del suelo, prosigue la caracterización de la exposición y vulnerabilidad teniendo en cuenta el parque inmobiliario del núcleo urbano de Lorca. Como unidad de trabajo para la asignación de la vulnerabilidad y cuantificación del riesgo se ha tomado el edificio, aunque estos se agruparán posteriormente por barrios, para la representación de resultados.

El primer paso para la asignación de la vulnerabilidad consiste en la generación de la base de datos con la información relativa a las edificaciones del parque inmobiliario. A partir de los datos publicados por la Dirección General de Catastro (DGC), se pudo obtener información georreferenciada correspondiente al uso de las edificaciones, el año de construcción y número de plantas. La metodología utilizada en esta tesis se limita a la estimación del riesgo sísmico en edificaciones de uso residencial.

La Tabla 5-4 muestra los barrios existentes en el núcleo urbano de Lorca y el número de edificios y de viviendas contenidos en cada uno de ellos. El número total de edificios contenidos en la base de datos del parque inmobiliario de Lorca es de 6199, que se corresponde con un total de 24373 viviendas.

Tabla 5-4. Barrios de la ciudad de Lorca y número de edificios y de viviendas contenidos en cada uno de ellos, obtenidos de la Dirección General de Catastro.

BARRIOS	Nº EDIFICIOS	Nº VIVIENDAS
Apolonia	96	529
Corazón de María	497	772
La Isla	195	725
La Viña	145	1980
Los Ángeles	80	957
Parroquias Altas	486	550
San Antonio	198	659
San Cristóbal	1374	5181
San Diego	53	56
San Fernando	134	760
San José	1185	4755
San Mateo	1094	4225
Santa Quiteria	286	655
Santiago	316	2414
Virgen de las Huertas	60	155

Como se mencionó en el apartado de asignación de vulnerabilidad del *Capítulo 3*, la edad de la edificación permite estimar el número de edificios que pertenecen a cada tipología constructiva. Estas tipologías constructivas se asignarán a cada edificio de acuerdo a las características estructurales de las edificaciones presentes en Lorca y se realizará la correspondencia de las mismas con las nomenclaturas de las tipologías definidas en la matriz de edificios dada en el método *M-2* del proyecto Risk-UE, desarrollado para edificaciones europeas. Esta matriz de edificios clasifica las edificaciones de acuerdo a su altura y código de diseño sismorresistente.

La la Figura 5.8 muestra el número de edificios y viviendas por años de construcción en toda la ciudad y la la Figura 5.8 la distribución geográfica de edificios por año de construcción en la misma. Como se puede apreciar en las figuras, la mayoría de las viviendas han sido construidas a partir de la década de 1950. La mayor parte de las construidas entre 1950 y 1970, se encuentran ubicadas en los barrios del casco antiguo (Figura 5.9, Zoom B), mientras que en el resto de la ciudad dominan las edificaciones más recientes, construidas a partir de la década de los 80.

Las distribución de edificios con diferentes números de plantas se ha representado en el mapa de la Figura 5.10. Se puede observar que la mayoría de los edificios de la ciudad cuentan con una altura correspondiente a 1 o 2 plantas, aunque en algunas zonas, especialmente en la zona norte de la ciudad, junto al barrio de San Cristóbal, existe una notable presencia de edificios de 5 a 6 plantas.

Figura 5.7. Número de edificios (arriba) y de viviendas (abajo) por año de construcción, según datos catastrales para la ciudad de Lorca.

la Figura 5.8. Mapa de distribución de edificios, según su año de construcción, en ciudad de Lorca. Los cuadros de zoom A y zoom B con una vista más amplia de estas zonas se muestra en la siguiente figura.

Figura 5.9. Mapa de distribución de edificios, según su año de construcción, en los barrios de San Cristóbal (arriba), y en los barrios del casco histórico y alrededores (Parroquias altas, Santiago y San Mateo).

Figura 5.10. Mapa de distribución de edificios, según su altura, en ciudad de Lorca.

Para identificar los tipos de estructuras y prácticas constructivas presentes en la ciudad de Lorca, se realizó una revisión bibliográfica de los estudios de vulnerabilidad de edificaciones realizados anteriormente en la Región de Murcia para los proyectos de análisis de riesgo sísmico que sustentaron los planes de emergencia (RISMUR, 2006; RISMUR II, 2014). También se realizaron visitas de campo expresamente para el desarrollo de esta tesis.

En base a lo anterior, en la ciudad de Lorca se pueden identificar cuatro grupos de tipologías constructivas para el caso de edificaciones de uso residencial: tres tipos de mampostería diferenciadas en la edificación tradicional y uno de hormigón armado, correspondiente a las edificaciones tecnológicas. A continuación se describen estas tipologías.

- Estructuras murarias de escombros de piedra o roca de cantera.

Este tipo de estructuras consiste en construcciones tradicionales, en las cuales se utilizan rocas desnudas como material básico de construcción, normalmente con un mortero de mala calidad, creando edificios pesados y con poca resistencia a las cargas laterales. La Figura 5.11 muestra un ejemplo de este tipo de estructura identificado en una visita a la ciudad de Lorca.

Figura 5.11. Estructura muraria de escombros de piedra identificada en el núcleo urbano de Lorca.

- Estructuras muraria sin reforzar con forjados de madera.

Estructuras con muros de ladrillo no reforzado. Es llamativo en este tipo de edificios el que no se hayan hecho intentos para mejorar los elementos horizontales de la estructura, siendo los pisos

generalmente de madera y por lo tanto flexibles. Un ejemplo de este tipo de estructuras se muestra en la Figura 5.12.

Figura 5.12. Estructura muraria sin reforzar, con forjados de madera, ubicada en la ciudad de Lorca.

- Mampostería de fábrica de ladrillo sin reforzar, con forjados rígidos de hormigón armado.

Estas edificaciones corresponden a un tipo de construcción donde los muros son de ladrillo no reforzado pero que tienen pisos de hormigón armado.

Estas estructuras se comportarán significativamente mejor que las viviendas normales de ladrillo. Los muros se unen entre sí mediante una solera rígida con vigas perimetrales, creando así una estructura de cajón que reduce de manera efectiva el riesgo de un colapso de los muros fuera del plano, así como la separación y distanciamiento de muros perpendiculares que se intersecten. Esta mejora del rendimiento sólo se materializa si el piso de hormigón armado está conectado adecuadamente a la estructura.

Un ejemplo de este tipo de estructuras, identificado en el casco histórico de la ciudad de Lorca, se muestra en la Figura 5.13.

Figura 5.13. Estructura muraria de fábrica de ladrillo sin reforzar, con forjados de hormigón, ubicada en la ciudad de Lorca.

- Estructura de pórticos de hormigón armado con paredes de mampostería sin reforzar

En la mayoría de los casos prácticos, los sistemas estructurales se pueden clasificar como de armazón de hormigón armado con rellenos de mampostería. La posible interacción entre el armazón de hormigón armado y los rellenos frágiles puede contribuir a un sistema más vulnerable. Debido a esta interacción, las columnas y enlaces tienen que reaccionar a cargas adicionales para las cuales no están diseñadas. Si el relleno tiene aperturas o tiene otras discontinuidades, es de esperar un efecto de “columna corta” que resulta en fallos de corte en las columnas (grietas diagonales e inclinación del reforzamiento de la columna). La Figura 5.14 muestra un ejemplo de este tipo de estructura, identificado en el barrio de La Viña, en ciudad de Lorca.

Figura 5.14. Estructura de pórticos de hormigón armado con paredes de mampostería sin reforzar, localizada en la ciudad de Lorca.

5.3.1 Asignación de vulnerabilidad a las edificaciones

Siguiendo los estándares de la metodologías habituales para la clasificación de vulnerabilidad, en este caso la desarrollada para el estudio de riesgo sísmico urbano en países europeos según el proyecto Risk-UE, estas tipologías constructivas se subdividen de acuerdo a su altura y código de diseño, dando un total de trece tipologías que se resumen en la Tabla 5-5.

Para asignar las tipologías constructivas existentes a la base de datos de edificaciones del estudio, en función de su fecha de construcción y número de plantas, se ha aplicado la matriz de transferencia propuesta por Murphy, P. en el estudio realizado para las edificaciones de la Región de Murcia (RISMUR II, 2014) (Tabla 5-6). La distribución de estos porcentajes de tipologías constructivas por año de construcción de muestra gráficamente en la Figura 5.15.

Tabla 5-5. Tipologías constructivas presentes en la ciudad de Lorca.

TIPOLOGÍA (NOMENCLATURA SEGÚN MATRIZ DE RISK-UE)		DESCRIPCIÓN	NÚMERO DE PISOS
M11	M11L	Estructura muraria de escombros de piedras	1-2
	M11M		3-5
M31	M31L	Estructura muraria sin reforzar con forjados de madera	1-2
	M31M		3-5
M34	M34L	Mampostería de fábrica de ladrillo sin reforzar con forjados rígidos de hormigón	1-2
	M34M		3-5
	M34H		≥ 6
RC31	RC31L-pre	Estructura de pórticos de hormigón armado con paredes de mampostería sin reforzar, sin código de diseño	1-3
	RC31M-pre		4-7
	RC31H-pre		≥ 8
	RC31L-low	Estructura de pórticos de hormigón armado con paredes de mampostería sin reforzar, con código de diseño bajo.	1-3
	RC31M-low		4-7
	RC31H-low		≥ 8

Tabla 5-6. Matriz de transferencia aplicada para la asignación de tipologías constructivas identificadas en la ciudad de Lorca, en función del año de construcción y del número de plantas de los edificios.

TIPO	M11		M31		M34			RC31-pre code			RC31-low code		
Altura	L	M	L	M	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Nº plantas	1-2	3+	1-2	3+	1-2	3-5	6+	1-2	3-5	6+	1-2	3-5	6+
SSRR	Pre	Pre	Pre	Pre	Pre	Pre	Pre	Pre	Pre	Pre	Low	Low	Low
<1900	57%	57%	43%	43%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1901 - 1920	21%	21%	71%	71%	8%	8%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1921 - 1940	60%	60%	75%	75%	19%	19%	19%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1941 - 1950	0%	0%	9%	9%	55%	55%	55%	36%	36%	36%	0%	0%	0%
1951 - 1960	0%	0%	2%	2%	43%	43%	43%	55%	55%	55%	0%	0%	0%
1961 - 1970	0%	0%	0%	0%	35%	35%	35%	65%	65%	65%	0%	0%	0%
1971 - 1980	0%	0%	0%	0%	18%	18%	18%	82%	82%	82%	0%	0%	0%
1981 - 1996	0%	0%	0%	0%	12%	0%	0%	88%	100%	100%	0%	0%	0%
1997 -2004	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	93%	100%	100%
2004 - 2013	0%	0%	0%	0%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	94%	100%	100%

Figura 5.15. Distribución de tipologías constructivas en Lorca por año de construcción, según la matriz de transferencia adoptada.

Asignando la matriz de transferencia a la base de datos se obtiene para la ciudad de Lorca que un 54% de los edificios residenciales corresponden a edificación tecnológica (hormigón armado), de los cuales un 12% cuenta con código de diseño sismorresistente por aplicaciones de las normas NCSE-94 y NSCE-02, correspondientes a un nivel de diseño “low-code”, según las clasificaciones del FEMA y Risk-UE. Estas normas son de obligado cumplimiento, actualmente, en zonas de España con aceleración básica superior a 0.04g, como es el caso de Lorca. El 46% de edificaciones restantes corresponden a edificaciones tradicionales (mampostería). La Figura 5.16 muestra la distribución porcentual de estas tipologías.

Figura 5.16. Distribución de vulnerabilidad del total del parque inmobiliario de la ciudad de Lorca.

El número de edificaciones tradicionales y tecnológicas construidas en diferentes décadas en la ciudad de Lorca, se muestra en la Figura 5.17 y su distribución en los diferentes barrios de la ciudad se puede observar en el mapa mostrado en la Figura 5.18, junto al rango de número total de edificios y viviendas en cada barrio.

Por otra parte, para controlar la incertidumbre inherente a la aleatoriedad de la asignación de tipologías en cada intervalo de fecha de construcción y altura, se aplicó un método estocástico de Montecarlo a través del cual se simularon 100 muestras de distribución de vulnerabilidad. Para cada una de las muestras se obtienen las probabilidades de diferentes grados de daño mediante los métodos de capacidad-demanda propuestos en el *Capítulo 3* y las curvas de fragilidad seleccionadas para cada tipología. Los resultados obtenidos de las simulaciones se ajustarán a una distribución normal (comprobando la normalidad del conjunto de muestras mediante un Test de Kolmogorov (Stephens, 1992)), de la cual se extraerá el valor medio de edificios con cada grado de daño y la desviación estándar para cada grado de daño. En este caso, los parámetros de riesgo sísmico se calcularán para los valores medios de la distribución.

Figura 5.17. Número de edificios tradicionales (mampostería) y tecnológicos (hormigón armado), por año de construcción, existentes en la ciudad de Lorca.

Figura 5.18. Arriba: Mapa de distribución de tipologías constructivas en ciudad de Lorca, divididas según su tipo de estructura principal (mampostería u hormigón armado) y número total de edificios en cada barrio. Abajo: Mapa de distribución de tipologías constructivas en ciudad de Lorca, divididas según su tipo de estructura principal (mampostería u hormigón armado) y número total de viviendas en cada barrio.

5.3.2 Población

Para la estimación de las víctimas y heridos asociados al escenario definido, se recopiló la información concerniente al número de habitantes en cada barrio de la ciudad de Lorca, y con el número de viviendas en los mismos, se estableció una densidad promedio de habitantes por vivienda. En cifras totales, al año 2016 la ciudad de Lorca contaba con 60,000 habitantes, según datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística de España y el Ayuntamiento de Lorca. La Figura 5.19 y Figura 5.20 muestran el número de habitantes y densidad por vivienda en los diferentes barrios.

Figura 5.19. Número de habitantes en los diferentes barrios de la ciudad de Lorca.

Figura 5.20. Densidad de habitantes por vivienda y número de viviendas en cada barrio de la ciudad de Lorca.

5.4 PARÁMETROS DE RIESGO SÍSMICO

Una vez calculados los espectros específicos que constituirán la demanda de aceleraciones en las edificaciones y asignada la vulnerabilidad de estas últimas, se procede a estimar los parámetros indicadores del riesgo sísmico en la ciudad de Lorca.

Los resultados de un estudio de riesgo sísmico como el aquí descrito están destinados a la interpretación y toma de decisiones de personal no especializado en la materia, como gestores económicos, políticos y técnicos de protección civil, cuyo objetivo final, generalmente, es diseñar planes de ordenamiento territorial y de emergencia ante la ocurrencia de un sismo. Por este motivo, la transmisión concisa y clara de los resultados se considera un aspecto de gran importancia dentro de un estudio como el propuesto en esta tesis.

En este apartado se exponen los mapas que representan los resultados del cálculo de riesgo, expresado en términos de los diferentes parámetros que han sido estimados para el escenario de peligrosidad, correspondiente al sismo de Mw 5.2. Los resultados aquí obtenidos serán comparados en un capítulo posterior, con los daños en edificaciones y pérdidas observados tras el terremoto del 11 de mayo de 2011.

5.4.1 Daño en edificaciones

Una de las contribuciones realizadas a la metodología aplicada en esta tesis es la incorporación de un árbol lógico en la estimación del daño en las edificaciones. De esta manera, al igual que en la peligrosidad, se incorporan al cálculo las incertidumbres epistemológicas inherentes a la elección de los modelos de atenuación seleccionados para el cálculo de los espectros específicos y a los métodos de capacidad-demanda aplicados para la cuantificación del daño asociado a este escenario sísmico. La incorporación de este árbol permite además realizar un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos en cada rama, los cuales serán comparados en este caso con los registros y daños observados en el terremoto de Lorca (*Capítulo 6*).

El daño en los edificios se ha estimado a través de la intersección de los espectros de respuesta obtenidos de la simulación del sismo Mw 5.2 (demanda), y las curvas de capacidad seleccionadas para cada tipología constructiva, mediante la aplicación de los métodos I-DCM y MADRS. El cálculo se realizó con los espectros de aceleraciones medias de cada modelo de atenuación empleado.

La Figura 5.21 muestra el árbol lógico utilizado para la estimación del daño físico en los edificios, de acuerdo a los modelos de atenuación empleados para la simulación del sismo, la asignación de vulnerabilidad implementando el método estocástico de Montecarlo a través de la simulación de 100 muestras de distribución de tipologías constructivas, los dos métodos de capacidad-demanda utilizados para el cálculo del punto de desempeño de los edificios y las probabilidades de daño obtenidas para cada muestra, de las cuales finalmente se extrae la media del número de edificios con cada grado de daño, con su desviación estándar.

Figura 5.21. Árbol lógico para la estimación del daño en los edificios, implementando el método de Montecarlo para la asignación de la vulnerabilidad.

Para representar la capacidad de los edificios, tras una revisión de los espectros de capacidad y curvas de fragilidad existentes en la bibliografía y recomendadas en el *Capítulo 3*, se seleccionaron los parámetros propuestos por Lagomarsino y Giovinazzi (2006) para los edificios de mampostería y los parámetros propuestos por Hazus-MH, para las edificaciones de hormigón armado. Los parámetros utilizados para representar los espectros de capacidad de cada tipología constructiva están dados por su desplazamiento y aceleración en el punto de fluencia y punto último de capacidad de la estructura. Estos parámetros se muestran en la Tabla 5-7 y una representación gráfica de los mismos se muestra en la Figura 5.22.

Tabla 5-7. Parámetros que definen los espectros de capacidad utilizados para la estimación de daños. D_y y A_y representan el desplazamiento y la aceleración en el punto de fluencia, D_u y A_u representan el desplazamiento y aceleración en el punto último, respectivamente.

Tipo	Fuente	Nomenclatura original	D_y (cm)	A_y (g)	D_u (cm)	A_u (cm)
M11L	L&G	M1L	0.19	0.17	0.89	0.17
M11M	L&G	M1M	0.42	0.13	1.35	0.13
M31L	L&G	M5L	0.28	0.28	1.40	0.28
M31M	L&G	M5M	0.63	0.22	2.11	0.22
M34L	L&G	M4L	0.36	0.32	1.71	0.32
M34M	L&G	M4M	0.80	0.26	2.60	0.26
M34H	L&G	M4H	0.97	0.17	2.90	0.17
RC31L-pre	Hazus	C3L-pre	0.30	0.10	3.43	0.23
RC31M-pre	Hazus	C3M-pre	0.66	0.08	4.95	0.19
RC31H-pre	Hazus	C3H-pre	1.88	0.06	10.49	0.14
RC31L-low	Hazus	C3L-low	0.30	0.10	3.43	0.23
RC31M-low	Hazus	C3M-low	0.66	0.08	4.95	0.19
RC31H-low	Hazus	C3H-low	1.85	0.06	10.49	0.14

Figura 5.22. Espectros de capacidad utilizados para el cálculo del punto de desempeño de los edificios.

La escala para la estimación de daños está basada en la descripción de grados de daño correspondiente a los autores de estos espectros de capacidad y sus correspondientes curvas de fragilidad. Para definir las curvas de fragilidad de las distintas tipologías constructivas, estos autores definen umbrales de desplazamiento espectral correspondientes a los valores medios de desplazamiento en cada estado de daño (Hazus-MH, 1999, Lagomarsino y Giovinazzi, 2006), establecidos desde la representación bilineal de los espectros de capacidad, donde el daño leve (D_1) es definido antes de alcanzar el punto de desplazamiento de cedencia, el daño moderado (D_2) se define justo en el desplazamiento de cedencia, el daño extenso (D_3) es definido después del punto de cedencia y el daño completo (D_4) es definido en el punto de la capacidad última, mediante las ecuaciones mostradas en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8. Umbrales de cada estado de daño establecidos por Hazus y Lagomarsino y Giovannazi (2006), donde Sd_i es el desplazamiento medio establecido para cada estado de daño i .

Umbral del estado de daño	Definición
Leve	$Sd_1 = 0.7 Dy$
Moderado	$Sd_2 = Dy$
Severo	$Sd_3 = Dy + 0.25 (Du - Dy)$
Completo	$Sd_4 = Du$

Así pues, mediante la ecuación de distribución de probabilidad lognormal que define las curvas de fragilidad [ecuación 3-55] en función del desplazamiento espectral medio correspondiente al umbral de cada estado de daño y de la desviación típica β asociada a dichos estados, se obtienen las probabilidades de que cada edificio alcance o exceda los distintos grados de daño establecidos.

La Tabla 5-9 muestra los valores medios y desviaciones típicas para cada estado de daño dadas por estos autores para definir las curvas de fragilidad que permiten estimar las matrices de probabilidad de daño esperada en los edificios. La Figura 5.23 muestra la representación gráfica de las curvas de fragilidad para la tipología M31L (mampostería no reforzada con diafragma flexible) y para la tipología RC31M-pre (hormigón armado con paredes de mampostería sin diseño sismorresistente).

Tabla 5-9. Parámetros que definen las curvas de fragilidad utilizadas para la estimación de grados de daños.

Tipología	Sd_1 (cm)	B_1	Sd_2 (cm)	B_2	Sd_3 (cm)	B_3	Sd_4 (cm)	B_4
M11L	0.13	0.62	0.29	0.62	0.54	0.62	0.89	0.62
M11M	0.29	0.47	0.63	0.47	0.89	0.47	1.35	0.47
M31L	0.20	0.64	0.42	0.64	0.84	0.64	1.40	0.64
M31M	0.44	0.48	0.95	0.48	1.37	0.48	2.11	0.48
M34L	0.25	0.62	0.54	0.62	1.04	0.62	1.71	0.62
M34M	0.56	0.47	1.20	0.47	1.70	0.47	2.60	0.47
M34H-pre	0.68	0.44	1.46	0.44	1.94	0.44	2.90	0.44
RC31L-pre	1.09	1.19	2.18	1.15	5.49	1.15	12.80	0.92
RC31M-pre	1.83	0.90	3.66	0.86	9.14	0.90	21.34	0.96
RC31H-pre	2.64	0.73	5.26	0.75	13.16	0.90	30.73	0.95
RC31L-low	1.37	1.09	2.74	1.07	6.86	1.08	16.00	0.91
RC31M-low	2.29	0.85	4.57	0.83	11.43	0.79	26.67	0.98
RC31H-low	3.30	0.71	6.58	0.74	16.46	0.90	38.40	0.97

Figura 5.23. Representación gráfica de las curvas de fragilidad para las tipologías M31L y RC31M-pre.

Una vez calculado el punto de desempeño y desplazamiento espectral de cada edificio ante la demanda sísmica, a través de estas curvas de fragilidad, se obtuvieron las probabilidades de alcanzar los diferentes estados de daño para cada edificio. Para poder obtener cifras globales del número total de edificios con cada grado de daño, los resultados se agruparon por barrios y se muestran en las siguientes tablas y mapas.

La Tabla 5-10 muestra las probabilidades de daño promedio obtenidas en cada barrio de la ciudad para el grado de daño nulo, leve, moderado, extenso y completo. A la vez se muestra el índice de daño medio obtenido en cada barrio. La

Tabla 5-11 muestra el número total de edificios y viviendas con cada grado de daño estimados para los diferentes barrios del núcleo urbano de Lorca, y en la Figura 5.24 y Figura 5.25 se muestran mapas con la distribución de los mismos.

Los mayores índices de daño medio se observan en los barrios de Parroquias Altas, Santiago y San Cristóbal, con valores entre 1.5 y 1.6, correspondientes a un daño medio moderado en las edificaciones de estas zonas. El resto de barrios presenta un índice de daño medio con valores entre 0.8 y 1.5, indicativos de un daño medio ligero en las estructuras, observándose el mayor valor en el barrio de San Diego. Sin embargo, los mayores números de edificios con daño completo se obtienen en los barrios de San Cristóbal, San Mateo, Parroquias Altas y San José. Esto se debe al elevado número de edificios concentrados en estos barrios, y a la cercanía de los mismos a la falla asociada al sismo simulado.

En cifras globales, se observa un total de 594 edificios que resultarían con daño completo, los cuales se corresponden con un total de 1154 viviendas.

Tabla 5-10. Matriz de probabilidad de daño resultante de la estimación de daños en edificios a través de los métodos de capacidad-demanda para los diferentes barrios de la ciudad de Lorca. D_0 representa el daño nulo, D_1 el daño leve, D_2 el daño moderado, D_3 el daño extenso, D_4 el daño completo y D_m es el índice de daño medio.

Barrio	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_m
Apolonia	0.42	0.22	0.20	0.10	0.06	1.15
Corazón de María	0.37	0.23	0.20	0.11	0.10	1.34
La Isla	0.34	0.21	0.23	0.14	0.09	1.43
La Viña	0.51	0.22	0.17	0.07	0.02	0.88
Los Ángeles	0.42	0.25	0.20	0.08	0.04	1.06
Parroquias Altas	0.29	0.22	0.21	0.13	0.14	1.60
San Antonio	0.44	0.21	0.20	0.11	0.04	1.09
San Cristóbal	0.30	0.23	0.22	0.12	0.13	1.55
San Diego	0.33	0.20	0.22	0.14	0.11	1.50
San Fernando	0.35	0.22	0.22	0.13	0.08	1.37
San José	0.44	0.23	0.18	0.09	0.06	1.08
San Mateo	0.34	0.24	0.21	0.11	0.10	1.38
Santa Quiteria	0.34	0.22	0.22	0.13	0.10	1.42
Santiago	0.29	0.24	0.22	0.12	0.13	1.58
Virgen de las Huertas	0.37	0.21	0.21	0.13	0.08	1.32

Tabla 5-11. Número de edificios y viviendas con cada grado de daño en los barrios de la ciudad de Lorca. E y V representan el número total de edificios y viviendas contenidos en cada barrio, ED_i y VD_i representan el número de edificios y viviendas con cada grado de daño i, respectivamente.

Barrio	E	V	ED ₀	ED ₁	ED ₂	ED ₃	ED ₄	VD ₀	VD ₁	VD ₂	VD ₃	VD ₄
Apolonia	96	529	40	21	19	10	6	271	128	89	29	12
Corazón de María	497	772	182	112	100	56	47	320	175	148	73	55
La Isla	195	725	66	41	44	27	17	261	183	171	74	35
La Viña	145	1980	74	32	25	11	3	1058	463	327	104	28
Los Ángeles	80	957	34	20	16	7	3	425	254	191	61	26
Parroquias Altas	486	550	143	108	103	63	69	172	122	115	68	73
San Antonio	198	659	87	42	39	21	8	300	138	132	67	22
San Cristóbal	1374	5181	414	315	296	170	179	2055	1324	1101	415	286
San Diego	53	56	18	11	11	8	6	19	11	12	8	6
San Fernando	134	760	46	30	30	17	11	303	198	168	64	26
San José	1185	4755	522	277	216	102	67	2487	1096	753	280	139
San Mateo	1094	4225	374	266	226	120	109	1629	1109	852	367	269
Santa Quiteria	286	655	97	63	62	37	27	251	155	146	64	39
Santiago	316	2414	90	75	70	38	43	882	638	548	215	132
Virgen de las Huertas	60	155	22	13	13	8	5	69	31	31	17	7

Figura 5.24. Mapa de distribución de daño en los edificios, en base al número de edificios con cada grado de daño, según la clasificación de grados de daño de Risk-UE: nulo, ligero, moderado, extenso y completo, en los diferentes barrios de la ciudad de Lorca, para el sismo de Mw5.2.

Figura 5.25. Mapa de distribución de viviendas con diferentes grados de daño (arriba) y del índice de daño medio (abajo) en los diferentes barrios de ciudad de Lorca, para el sismo de Mw5.2.

5.4.2 Viviendas inhabitables y personas que quedarían sin hogar

El número de viviendas que quedarían inhabitables se estima a partir de la relación empírica propuesta por Vacareanu et al. (2004), a partir del porcentaje de edificios que resultarían con daño completo, más el 90% del porcentaje total de edificios con daño extenso, y el número de viviendas contenidos en estas edificaciones. Junto a este parámetro, conociendo el número de habitantes medio por vivienda, es posible estimar el número de personas que quedarían sin hogar. Estas cifras son valoradas por ayuntamientos y autoridades a la hora de establecer los planes de emergencia pertinentes en los municipios y ciudades.

La Tabla 5-12 muestra el número de viviendas inhabitables y personas que quedarían sin hogar, resultantes del escenario simulado y la Figura 5.26 muestra el mapa de distribución de los mismos en la ciudad de Lorca. Los mayores valores de estos parámetros se observan en los barrios de San Cristóbal, San Mateo y San José, llegando a alcanzar en el primero cifras que sobrepasan las 600 viviendas inhabitables, lo que dejaría una cifra aproximada de 1685 personas sin hogar en este barrio. En cifras globales, para el núcleo urbano de Lorca, ante este sismo, los resultados obtenidos muestran una cifra de 2870 viviendas inhabitables y 6866 personas que resultarían sin hogar.

Tabla 5-12. Número de viviendas inhabitables y personas que quedarían sin hogar para el escenario del sismo Mw 5.2, en ciudad de Lorca.

Barrio	Viviendas inhabitables	Personas sin hogar
Apolonia	38	125
Corazón de María	121	64
La Isla	102	648
La Viña	121	284
Los Ángeles	81	260
Parroquias Altas	134	333
San Antonio	83	80
San Cristóbal	660	1685
San Diego	13	85
San Fernando	84	505
San José	391	991
San Mateo	599	1492
Santa Quiteria	97	101
Santiago	325	76
Virgen de las Huertas	22	137

Figura 5.26. Mapa de distribución de viviendas inhabitables (arriba) y personas que resultarían sin hogar (abajo) para el sismo de Mw5.2, en los diferentes barrios de ciudad de Lorca.

5.4.3 Pérdidas humanas

Las pérdidas humanas asociadas al escenario del sismo Mw 5.2 se han estimado a partir del número de viviendas que resultan con daño completo en la estimación del daño físico en las edificaciones. A partir de estos valores, se ha calculado el número de edificios y viviendas que alcanzarían el colapso a través de las ecuaciones propuestas por Lagomarsino y Giovinazzi (2006), para el caso de las viviendas de mampostería, y la propuesta de Hazus para el caso de los edificios de vivienda de hormigón armado, según la cual el porcentaje de colapso representa un 15% del porcentaje de edificios con daño completo.

Con el número de viviendas que alcanzarían el colapso y el número de habitantes en cada vivienda, se ha estimado el número de víctimas mortales y de heridos con diferentes niveles de afectación, siendo estos: heridos con carácter de urgencia, heridos que requerirán atención médica y personas con heridas leves, a través de las relaciones empíricas propuestas por Coburn y Spence (2002), expuestas en el *apartado 3.7.3.4. del Capítulo 3*.

Para establecer el factor M2, que representa el porcentaje de personas que se encuentran en su vivienda a la hora de ocurrencia del terremoto, se utilizó el valor obtenido de las curvas propuestas por los autores para edificios residenciales de áreas urbanas, para tres franjas horarias: mañana, tarde y noche, y se obtuvo un promedio de los resultados de las mismas. Los factores y las franjas horarias seleccionadas han sido:

- Factor M2 = 0.8 para la franja horaria de las 2:00 horas.
- Factor M2 = 0.45 para la franja horaria de las 10:00 horas
- Factor M2 = 0.7 para la franja horaria de las 19:00 horas

Para representar el porcentaje medio de personas atrapadas por colapso, que depende de la intensidad del movimiento, se calculó la intensidad a partir de las aceleraciones de los espectros de respuesta, empleando la siguiente ecuación de correlación (Proyecto RISMUR):

$$I = 0.0661 \log PGA + 3.247 \log EPA + 0.1311 \quad [5-1]$$

Donde EPA es la aceleración pico efectiva, definida como el promedio de las aceleraciones espectrales en el intervalo de periodos de 0.1 a 0.5 s dividido por 2.5.

Aplicando esta correlación, se obtiene como resultado para este movimiento una intensidad de VII, la cual se corresponde con la intensidad dada por el Instituto Geográfico Nacional para el terremoto de Lorca de 2011, en el cual se basaron las características del sismo y plano de ruptura simulado en este

escenario.

Por último, para el porcentaje de víctimas post-evento se ha aplicado el factor correspondiente a una comunidad con una buena respuesta postevento (tipo 4).

La Tabla 5-13 y la Figura 5.27 muestran los resultados obtenidos en cuanto a las pérdidas humanas asociadas al escenario de daño simulado. El mayor número de víctimas se observa en los barrios de San Cristóbal y San Mateo, pudiéndose alcanzar cifras de más de 20 fallecidos y alrededor de 60 heridos. En cifras totales, se observa que este sismo podría generar 86 víctimas mortales y 240 heridos en la ciudad de Lorca. Llama la atención el número elevado de víctimas mortales, en comparación con las cifras observadas tras el terremoto de Lorca (9 fallecidos y 340 heridos). Sin embargo, no hay que olvidar que el número de víctimas en Lorca pudo ser mucho mayor, ya que afortunadamente las personas se encontraban fuera de los edificios por el sismo premonitor ocurridos unas horas antes.

Tabla 5-13. Número de edificios y viviendas que alcanzarían el colapso, y número de víctimas mortales y heridos de diferentes grados, asociados a este daño, para el escenario definido por el sismo Mw 5.2 en ciudad de Lorca.

Barrio	Edificios Colapsados	Viviendas colapsadas	Muertos	Heridos de urgencia	Atención médica	Con heridas leves
Apolonia	0	2	1	1	1	1
Corazón de María	3	5	1	1	1	1
La Isla	1	5	8	7	8	7
La Viña	0	4	3	2	3	2
Los Ángeles	0	3	3	3	3	3
Parroquias Altas	3	4	3	3	3	3
San Antonio	1	3	1	1	1	1
San Cristóbal	5	35	24	21	24	21
San Diego	1	1	1	1	1	1
San Fernando	0	4	6	5	6	5
San José	3	17	12	10	12	10
San Mateo	5	30	20	18	20	18
Santa Quiteria	1	4	1	1	1	1
Santiago	1	17	1	1	1	1
Virgen de las Huertas	0	1	2	1	2	1

Figura 5.27. Mapa de distribución de víctimas mortales (arriba) y heridos de diferentes grados: con carácter de urgencia, que necesitan atención médica y heridos leves, junto al número total de heridos (abajo), en los diferentes barrios de ciudad de Lorca.

5.4.4 Pérdidas económicas

Para calcular los costes asociados a los daños en las edificaciones se ha tomado como punto de partida el índice de costes estimados en el sismo de Lorca para reconstrucción y reparación de viviendas, obtenidos de la Delegación de Gobierno de la Región de Murcia y mostrados en la Figura 5.28.

Para este fin, se estableció una relación entre los grados de daño definidos y el triaje realizado tras el terremoto de Lorca para la evaluación de habitabilidad de los edificios. La relación establecida se muestra en la Tabla 5-14.

Figura 5.28. Costes del terremoto de Lorca. Fuente: Delegación del Gobierno en la Región de Murcia (al año 2012).

Tabla 5-14. Equiparación de grados de daño definidos en la metodología empleada (Risk-UE) y el triaje de evaluación de edificios realizado en Lorca tras el terremoto de 2011.

Triaje	Grado de daño
Negro	Completo
Rojo	Extenso
Amarillo	Moderado
Verde	Leve

En base a esta equiparación, se han establecido los costes esperados para los distintos grados de daño

y se han multiplicado por el número de viviendas con cada uno de estos grados de daño, pudiendo estimar así las pérdidas económicas asociadas al escenario simulado. Los resultados para cada barrio y cifras totales se muestran en la Tabla 5-15. Un mapa representativo de la distribución de éstas pérdidas económicas en la ciudad de Lorca se muestra en la Figura 5.29.

Las mayores pérdidas económicas, asociadas a los daños sufridos por las edificaciones se observan en el barrio de San Cristóbal, seguido por los barrios de San Mateo, San José y Santiago. En cifras globales, se estima un coste de reconstrucción de 122.5 millones de euros para los edificios y viviendas con daño completo, muy cercano al valor real de 123.4 millones de euros, correspondiente a la reconstrucción de los edificios y viviendas catalogados con color negro en el triaje del terremoto de Lorca, según las cifras de la Delegación del Gobierno de la Region de Murcia mostradas en la Figura 5.28. De igual manera, para el daño extenso y moderado se obtienen cifras con valor de 76.3 millones de euros y 95.7 millones de euros, respectivamente, equiparables a las cifras reales para las edificaciones de color rojo y amarillo del triaje de Lorca, estimadas en 78.9 y 91.9 millones de euros. Esto indica que el número de viviendas obtenidos para cada grado de daño con la simulación del escenario de daño asociado al sismo Mw 5.2, en términos globales, es equiparable al daño real en las viviendas observado tras el terremoto de Lorca de 2011.

Tabla 5-15. Costes de reconstrucción y reparación estimados para las viviendas con diferentes grados de daño en los barrios de la ciudad de Lorca. VD_i representa el número de viviendas con grado de daño i ($i=0$ para daño nulo, 1 para daño ligero, 2 para daño moderado, 3 para daño extenso y 4 para daño completo). Reconstrucción representa los costes de reconstrucción de las viviendas con daño completo, y Rep. Extensa, Rep. Moderada y Rep. Ligera los costes de reparación de las viviendas con daño extenso, moderado y leve, respectivamente.

BARRIOS	VD_0	VD_1	VD_2	VD_3	VD_4	RECONSTRUCCIÓN	REP. EXTENSA	REP. MODERADA	REP. LIGERA	COSTE TOTAL
Apolonia	271	128	89	29	12	1 272 000.00 €	1 160 000.00 €	1 780 000.00 €	1 152 000.00 €	5 364 000.00 €
Corazón de María	320	175	148	73	55	5 830 000.00 €	2 920 000.00 €	2 960 000.00 €	1 575 000.00 €	13 285 000.00 €
La Isla	261	183	171	74	35	3 710 000.00 €	2 960 000.00 €	3 420 000.00 €	1 647 000.00 €	11 737 000.00 €
La Viña	1058	463	327	104	28	2 968 000.00 €	4 160 000.00 €	6 540 000.00 €	4 167 000.00 €	17 835 000.00 €
Los Ángeles	425	254	191	61	26	2 756 000.00 €	2 440 000.00 €	3 820 000.00 €	2 286 000.00 €	11 302 000.00 €
Parroquias Altas	172	122	115	68	73	7 738 000.00 €	2 720 000.00 €	2 300 000.00 €	1 098 000.00 €	13 856 000.00 €
San Antonio	300	138	132	67	22	2 332 000.00 €	2 680 000.00 €	2 640 000.00 €	1 242 000.00 €	8 894 000.00 €
San Cristóbal	2055	1324	1101	415	286	30 316 000.00 €	16 600 000.00 €	22 020 000.00 €	11 916 000.00 €	80 852 000.00 €
San Diego	19	11	12	8	6	636 000.00 €	320 000.00 €	240 000.00 €	99 000.00 €	1 295 000.00 €
San Fernando	303	198	168	64	26	2 756 000.00 €	2 560 000.00 €	3 360 000.00 €	1 782 000.00 €	10 458 000.00 €
San José	2487	1096	753	280	139	14 734 000.00 €	11 200 000.00 €	15 060 000.00 €	9 864 000.00 €	50 858 000.00 €
San Mateo	1629	1109	852	367	269	28 514 000.00 €	14 680 000.00 €	17 040 000.00 €	9 981 000.00 €	70 215 000.00 €
Santa Quiteria	251	155	146	64	39	4 134 000.00 €	2 560 000.00 €	2 920 000.00 €	1 395 000.00 €	11 009 000.00 €
Santiago	882	638	548	215	132	13 992 000.00 €	8 600 000.00 €	10 960 000.00 €	5 742 000.00 €	39 294 000.00 €
Virgen de las Huertas	69	31	31	17	7	742 000.00 €	680 000.00 €	620 000.00 €	279 000.00 €	2 321 000.00 €
Total general	10507	6031	4788	1908	1155	122 536 000.00 €	76 280 000.00 €	95 740 000.00 €	54 261 000.00 €	348 817 000.00 €

Figura 5.29. Mapa de distribución de pérdidas económicas asociadas al escenario del sismo de Mw5.2. Arriba: costes totales por barrio. Abajo: costes de reconstrucción (en millones de euros); abajo: costes de reparación totales, y según el tipo de reparación: ligera, moderada y extensa.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y COMPARATIVA CON DATOS DEL TERREMOTO DE LORCA DE 2011

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran las modelizaciones, calibraciones y comparaciones realizadas con la información existente y características del terremoto sucedido en Lorca el 11 de mayo de 2011.

En primer lugar se presentan los modelos de fuente de diversos estudios científicos realizados tras el terremoto para determinar la localización del hipocentro y una simulación del movimiento generado a través de distintos modelos de atenuación, del Instituto Geográfico Nacional en la región, determinando así el plano de ruptura que mejor se ajusta al movimiento real registrado.

En el siguiente apartado, se presenta una comparativa de los resultados de aceleraciones, tanto en términos de PGA como para las diferentes ordenadas espectrales, obtenidas con los modelos de atenuación utilizados. Estas se comparan con el espectro de respuesta correspondiente a los registros del acelerógrafo de la estación de Lorca, para determinar la sensibilidad en cuanto a la elección de modelos de atenuación.

Posteriormente, se presentan una serie de análisis de sensibilidad realizados en cuanto a la asignación de tipologías constructivas sobre la base de datos de edificaciones de Lorca, cuantificando la incertidumbre de esta asignación mediante un método estocástico de Montecarlo. En este apartado se describe cómo, a partir de este proceso, se pueden obtener los valores medios del daño en edificios y la desviación estándar asociada a estos daños. Este análisis ha sido realizado, en primer lugar, para diferentes distribuciones de vulnerabilidad, pudiendo así comprobar su aplicabilidad en otro tipo de estudios. Luego, se ha aplicado el método al caso concreto de Lorca, realizando un análisis para la distribución de vulnerabilidad de una muestra de edificios evaluada en campo, y para la vulnerabilidad asignada a todo el parque inmobiliario de la ciudad de Lorca.

Por último, se presenta la comparación de los daños obtenidos de la simulación del sismo para cada modelo de atenuación, tanto con los valores medios como incluyendo la sigma de los modelos, y de los resultados obtenidos con los dos métodos de capacidad-demanda utilizados, con los daños reales ocurridos tras el terremoto de Lorca y la correspondencia de los grados de daños adoptados en la metodología de riesgo con el triaje de evaluación de edificios realizado tras el terremoto.

Los resultados del análisis que se presenta en este capítulo permiten identificar que modelos y método reproducen mejor el escenario de daños reales observados en el terremoto de Lorca, 2011.

6.2 MODELIZACIÓN DEL PLANO DE RUPTURA

Para la evaluación del riesgo sísmico del primer escenario obtenido de la desagregación, definido por el sismo más probable asociado al periodo de retorno de 475 años, se eligió simular el terremoto de Lorca del 2011, que coincide en magnitud y distancia con el rango de valores obtenido para este sismo de control.

El primero paso en la simulación del sismo desde un enfoque determinista es modelizar el plano de ruptura correspondiente a su magnitud y a las características de la falla que puede generarlo. Para simular de la mejor manera el terremoto de Lorca y así poder comparar los resultados obtenidos de los modelos de atenuación seleccionados con el movimiento real registrado, se han analizado, en primer lugar, las soluciones sobre los planos de ruptura calculados en diferentes estudios tras el terremoto. Estos estudios han utilizado acelerogramas registrados en diferentes estaciones del IGN y el IAG para determinar la localización hipocentral y el área de ruptura de este sismo, mediante el método de inversión del tensor momento sísmico (Rueda et. al, 2011; Buforn et. al, 2011; López-Comino et. al, 2012; Martínez-Díaz et al., 2012, Santoyo, 2013). Todos estos estudios han coincidido en determinar un mecanismo de falla de desgarre con componente inversa ocurrido en la falla de Alhama de Murcia (Visser and Meijninger, 2011).

Según la base de datos QAFI el plano de ruptura de la falla de Alhama de Murcia, en su segmento Lorca-Totana, presenta un azimuth de $238^{\circ} \pm 4$, buzamiento de 70° y ángulo de deslizamiento de $18-75^{\circ}$, aproximadamente. Las soluciones propuestas por Martínez-Díaz et. al (2012), López-Comino et al. (2012) y Santoyo (2013) arrojan como resultado un azimuth entre 235 y 240 para el plano de ruptura, compatible con las características observadas para esta falla. Sin embargo, muestran un buzamiento de $54-55^{\circ}$, menor que el de QAFI. Sin embargo el IGN, apunta a un buzamiento de 69° casi coincidente con el de QAFI. Los tres primeros autores coinciden en que el momento sísmico liberado corresponde a un sismo de $M_w 5.2$, con un área de ruptura mayor a la generalmente asociada a un sismo de esta magnitud. Todos coinciden en que la longitud de ruptura del sismo ha sido aproximadamente de $3-4$ km, aunque López-Comino(2012) supone un área de 15 km^2 , Martínez-Díaz (2012) ha determinado un área de ruptura de $4 \times 3 \text{ km}^2$, mientras que Santoyo (2013) ha asumido un área de ruptura de $4 \times 4 \text{ km}^2$.

Los hipocentros y geometría del plano de ruptura empleados en la simulación hecha en este trabajo, son los publicados en los trabajos de López-Comino (2012), Martínez-Díaz et al. (2012) y Santoyo

(2013). Las características de la ruptura según cada uno de los estudios mencionados, incluyendo también el del IGN, se muestra en la Tabla 6-1 y Tabla 6-2. Las Figura 6.1 y Figura 6.2 muestran la vista en superficie y la vista isométrica con la localización espacial de estos planos de ruptura con respecto a la falla de Alhama de Murcia (Lorca-Totana).

Tabla 6-1. Hipocentros localizados en los estudios de López-Comino, et al. (2012), Martínez-Díaz et. al (2012a), Santoyo (2013), y el IGN.

LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL				
	LATITUD	LONGITUD	Z (Km)	DESCRIPCIÓN
López-Comino (2012)	37.727	-1.686	4.6	Inicio de ruptura
Martínez-Díaz (2012a)	37.6884 ± 0.003	-1.6798 ± 0.004	1.5 ± 0.5	Punto medio de la traza
Santoyo (2013)	37.7101	-1.7014	5.3	Inicio de ruptura
IGN (web, 2017)	37.7175	-1.7114	4	Centroide

Tabla 6-2. Características de la ruptura modelizada por López-Comino (2012), Martínez-Díaz (2012a), Santoyo (2012), y el IGN.

	AZ. (°)	BUZ. (°)	DES. (°)	TECHO (Km)	Mo (Nm)	Mw	MECANISMO
López-Comino (2012)	240	54	44	2	$6.5E+16$	5.2	Inverso
Martínez-Díaz (2012a)	235	55	39	1.5 ± 0.5	$5.18E+16$	5.2	Inverso
Santoyo (2013)	240	55	45	3.7	$6.5E+16$	5.2	Inverso
IGN (web, 2017)	230	69	33	-	$4.89E+23$	5.1	Inverso

Figura 6.1. Vista en superficie de la modelización de los planos de ruptura estimados por López-Comino, 2012 (en amarillo), Martínez-Díaz, 2012 (en verde), Santoyo, 2012 (en naranja) y el IGN (en azul). Arriba: vista completa de la falla de Alhama de Murcia y de los planos de ruptura. Abajo: Vista zoom a los planos de ruptura.

Figura 6.2. Vista isométrica de los planos de ruptura modelizados y el plano de falla de Alhama de Murcia, en su segmento Lorca-Totana, con respecto a la superficie del terreno.

Considerando los planos de ruptura antes mencionados se ha realizado una modelización del movimiento esperado a diferentes distancias, para su comparación con las aceleraciones realmente registradas en distintas estaciones del Instituto Geográfico Nacional en la región. La localización de estas estaciones se muestra en la Figura 6.3. El movimiento se modelizó empleando los modelos de atenuación seleccionados de la NG-West2.

La Tabla 6-3 muestra los valores medios de aceleraciones PGA obtenidas para los tres modelos de atenuación utilizados y para los cuatro planos de ruptura modelizados, junto a las aceleraciones PGA registradas durante el sismo. Estos resultados se muestran para siete estaciones de la Región de Murcia y para la estación más cercana al epicentro de la Comunidad de Andalucía (estación Vélez-Rubio), tomando en cuenta el tipo de suelo en cada estación. Como los modelos de atenuación utilizan la media geométrica de las dos componentes horizontales, la comparación se ha realizado con la media geométrica de las aceleraciones registradas en las componentes N-S y E-W de los acelerógrafos.

Figura 6.3. Localización de estaciones del IGN que registraron el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011.

Según los resultados observados, la mayor parte de las aceleraciones registradas en las diferentes estaciones se encuentran contenidas en el rango de aceleraciones obtenidas por los modelos de atenuación tomando en cuenta la sigma del modelo. Dos excepciones se presentan en las estaciones de Mula y Cieza, donde aún incluyendo la sigma de los modelos, las aceleraciones registradas son menores a las predichas en el primer caso y mayores en el segundo.

Como se puede observar en la Tabla 6-3, el plano de ruptura que presenta los valores medios más cercanos a las aceleraciones reales registradas es el plano estimado por Martínez-Díaz et al. (2012), por lo cual este plano ha sido elegido para la simulación del escenario de daños del sismo asociado al periodo de retorno de 475 años para la ciudad de Lorca.

Calibración y análisis de sensibilidad con datos del terremoto de Lorca de 2011

Tabla 6-3. Aceleraciones obtenidas de la simulación de los planos de ruptura de López-Comino et al. (2012), Martínez-Díaz et al. (2012), Santoyo (2013) y del IGN, junto con las aceleraciones registradas en las distintas estaciones del IGN en la Región de Murcia. PGA (MG) representa la media geométrica de las 2 componentes horizontales registradas. Se indican las aceleraciones medias predichas por los modelos.

ESTACIÓN	REGISTRO PGA (MG)	LÓPEZ-COMINO (2012)			MARTÍNEZ-DÍAZ (2012)			SANTOYO (2012)			IGN		
		ASK13	CB13	CY13	ASK13	CB13	CY13	ASK13	CB13	CY13	ASK13	CB13	CY13
Lorca (MU)	0.237	0.177	0.181	0.191	0.194	0.204	0.246	0.175	0.167	0.179	0.153	0.147	0.152
Alhama de Murcia-Polideportivo (MU)	0.045	0.042	0.035	0.035	0.040	0.035	0.033	0.044	0.034	0.037	0.037	0.029	0.029
Cieza (MU)	0.003	0.008	0.008	0.006	0.008	0.008	0.006	0.009	0.008	0.007	0.007	0.007	0.006
Lorquí (MU)	0.008	0.011	0.011	0.009	0.011	0.010	0.008	0.012	0.010	0.010	0.010	0.009	0.008
Mula (MU)	0.039	0.024	0.020	0.019	0.022	0.019	0.018	0.025	0.020	0.020	0.021	0.017	0.017
Murcia (MU)	0.008	0.018	0.014	0.015	0.017	0.014	0.014	0.019	0.014	0.016	0.016	0.011	0.013
Vélez-Rubio (AL)	0.010	0.022	0.021	0.018	0.021	0.020	0.016	0.024	0.021	0.019	0.021	0.018	0.016
Zarcilla de Ramos (MU)	0.034	0.046	0.042	0.039	0.040	0.038	0.034	0.048	0.041	0.041	0.043	0.037	0.036

6.3 COMPARATIVA DE MODELOS DE PREDICCIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE CON EL ESPECTRO DE ACELERACIONES REGISTRADAS DURANTE EL TERREMOTO DE LORCA

Tras la modelización del plano de ruptura, se ha realizado una comparación de las aceleraciones PGA registradas en cada estación con los valores medios μ y $\mu \pm \sigma$ dados con cada modelo de atenuación para la simulación realizada tomando como modelo de fuente la solución de Martínez-Díaz et al. (2012) (Figura 6.4).

Al mismo tiempo, se ha realizado una comparación de las aceleraciones obtenidas para la distintas ordenadas espectrales con el espectro derivado de los registros de la estación de Lorca. Además de los modelos de atenuación de la NGA-West2, se ha realizado la comparación con el modelo propio de Ruiz et al. (2012), formulado con datos españoles para terremotos de magnitudes $M_w < 5.5$.

Al igual que en el caso del apartado anterior, la comparación de los espectros obtenidos de cada modelo con el espectro real registrado se ha realizado tomando la media geométrica de las 2 componentes horizontales registradas.

La Figura 6.5 muestra los espectros medios y medios $\pm \sigma$ obtenidos con cada modelo de atenuación junto con el espectro de respuesta del terremoto de Lorca, todos calculados en la coordenada donde se localiza el acelerógrafo de la estación de Lorca que registró el movimiento.

El terremoto de Lorca del 2011 registró una aceleración pico efectiva de 0.367 g en la componente N-S y de 0.155 g en la componente E-W, dando una media geométrica de 0.238 g. Como se puede observar en la Figura 6.5 y la Tabla 6-4, los modelos de ASK13, CB13 y CY13 muestran un valor de aceleración media en PGA para esta coordenada muy cercano al valor real, con valores de 0.194 g, 0.204 g y 0.246 g, respectivamente. El modelo que mejor se ajusta al espectro real en los periodos contenidos entre $T=0$ y $T=0.2$ segundos es el modelo de CB13, seguido por el de ASK13, mientras que el modelo de CY13 presenta aceleraciones más elevadas de las registradas para estos periodos. Sin embargo, para periodos de 0.5s en adelante, es el modelo de CY13 el que presenta los valores más

cercanos al espectro registrado, especialmente los valores de aceleraciones correspondientes a $\mu \pm \sigma$ del modelo.

Figura 6.4. Aceleraciones medias, μ , y $\mu \pm \sigma$ obtenidas por los modelos de atenuación de a) Abrahamson et al., 2013, b) Campbell y Bozorgnia, 2013 y c) Chiou y Youngs, 2013 para la simulación del sismo de Mw 5.2 con el modelo de fuente de Martínez-Díaz, 2012, y la PGA registrada en las estaciones del IGN.

Por otro lado, el modelo propio Ruiz et. al, 2012 muestra valores muy por debajo del espectro registrado y del resto de modelos, tanto en los valores medios como en los medios $\pm$ sigma. Sin embargo, llama la atención que este modelo es el único de los cuatro estudiados que sigue la tendencia de mantener la meseta del espectro hasta el periodo de 0.5 segundos, tal como se observa en el espectro registrado, mientras que el resto de modelos muestran picos de aceleración en los periodos de 0.1 y 0.2s decreciendo rápidamente a partir de este periodo. El modelo de Ruiz et al reproduce mejor la forma del espectro real y se acerca a éste cuando se incluye una desviación $\mu + \sigma$.

Figura 6.5. Espectros de respuesta obtenidos con los modelos de atenuación de a) arriba izq.: Abrahamson et al., 2013, b) arriba der.: Campbell y Bozorgnia, 2013 y c) abajo izq.: Chiou y Youngs, 2013 y d) abajo der.: Ruiz et al., 2012 para la simulación del sismo de Mw5.2 y su comparación con el espectro del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 (en amarillo).

Tabla 6-4. Aceleraciones espectrales registradas durante el terremoto de Lorca de 2011 en las componentes Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EW) y la media geométrica de las mismas (MG), en comparación con las aceleraciones obtenidas con los modelos de atenuación de Abrahamson et al. (ASK13), Campbell y Bozorgnia (CB13), Chiou y Youngs (CY13) y el modelo propio de Ruiz et al. (MP12). Estas representan la media geométrica de las componentes horizontales. Todos los valores están dados en g.

T	TERREMOTO LORCA			MODELOS			
	N-S	E-W	MG	ASK13	CB13	CY13	MP12
0	0.367	0.155	0.238	0.194	0.204	0.246	0.067
0.1	0.617	0.244	0.388	0.445	0.367	0.590	0.089
0.2	0.599	0.286	0.414	0.388	0.341	0.627	0.147
0.3	0.892	0.326	0.540	0.254	0.322	0.503	0.140
0.5	0.788	0.429	0.582	0.143	0.181	0.285	0.122
0.75	0.404	0.204	0.287	0.087	0.127	0.154	0.080
1	0.224	0.101	0.150	0.059	0.081	0.091	0.038
1.5	0.126	0.047	0.077	0.029	0.033	0.041	0.023
2	0.070	0.026	0.043	0.018	0.018	0.023	0.009

Por otro lado, para conocer la distribución y atenuación del movimiento generado con cada modelo de predicción, se realizó una simulación del sismo para una malla rectangular cubriendo la ciudad de Lorca y alrededores. La distribución de aceleraciones PGA medias obtenidas con cada modelo, en condiciones de roca, se puede observar en los mapas mostrados en la Figura 6.6. De los modelos aplicados, el modelo de CY13 es el que presenta los mayores valores de aceleración. Estas aceleraciones se obtienen en el área próxima a la fuente y se atenúan rápidamente en las zonas circundantes. Los modelos de CB13 y ASK13 generan menores aceleraciones que las de CY13 entorno a la fuente. Sin embargo, muestran una atenuación mas lenta que las de CY13. Por último, el modelo propio presenta valores medios notablemente menores que el resto de modelos.

Finalmente, los resultados de aceleraciones obtenidos dentro del área abarcada por la ciudad de Lorca según cada modelo de atenuación, tomando en cuenta los tipos de suelos existentes en la ciudad en base al mapa de velocidades Vs30 mostrado en el *Capítulo 4* y para las ordenadas espectrales de T=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 1.5 y 2 segundos, se muestran en la Tabla 6-5.

Figura 6.6. Mapas de aceleraciones PGA medias obtenidas con los modelos de atenuación de a) arriba izq.: Abrahamson et al., 2013, b) arriba der.: Campbell y Bozorgnia, 2013 y c) abajo izq.: Chiou y Youngs, 2013 y d) abajo der.: Ruiz et al., 2012 para la simulación del sismo de Mw5.2.

Tabla 6-5. Valores de aceleración para diferentes ordenadas espectrales obtenidos de la simulación del sismo Mw 5.2, para los cuatro modelos de atenuación empleados, siendo Y la aceleración media del modelo, $Y+\sigma$ la aceleración más la sigma del modelo y $Y-\sigma$ la aceleración menos la sigma del modelo.

T	ASK13			CB13			CY13			MP12		
	Y	Y+ σ	Y- σ	Y	Y+ σ	Y- σ	Y	Y+ σ	Y- σ	Y	Y+ σ	Y- σ
PGA	0.2- 0.25	0.42- 0.48	0.1- 0.13	0.18- 0.23	0.29- 0.35	0.11- 0.15	0.24- 0.35	0.46- 0.67	0.13- 0.18	0.08- 0.09	0.23- 0.26	0.02- 0.03
Sa0.1s	0.43- 0.48	0.91- 1.00	0.20- 0.26	0.28- 0.38	0.45- 0.65	0.17- 0.22	0.54- 0.70	1.13- 1.46	0.26- 0.33	0.11- 0.22	0.33- 0.68	0.03- 0.07
Sa0.2s	0.46- 0.58	0.93- 1.11	0.22- 0.32	0.33- 0.38	0.52- 0.60	0.21- 0.25	0.62- 0.84	1.22- 1.66	0.31- 0.43	0.17- 0.35	0.50- 0.80	0.06- 0.12
Sa0.3s	0.35- 0.54	0.74- 1.04	0.17- 0.29	0.37- 0.46	0.57- 0.69	0.24- 0.30	0.52- 0.85	0.99- 1.63	0.27- 0.44	0.17- 0.33	0.50- 0.80	0.06- 0.11
Sa0.5s	0.20- 0.40	0.42- 0.75	0.09- 0.21	0.23- 0.40	0.36- 0.60	0.15- 0.27	0.34- 0.66	0.63- 1.25	0.18- 0.35	0.14- 0.28	0.47- 0.78	0.04- 0.09
Sa0.75s	0.12- 0.26	0.25- 0.50	0.06- 0.14	0.16- 0.34	0.27- 0.53	0.10- 0.22	0.19- 0.43	0.36- 0.79	0.10- 0.23	0.11- 0.21	0.35- 0.66	0.03- 0.06
Sa1.0s	0.08- 0.18	0.16- 0.36	0.04- 0.09	0.10- 0.25	0.17- 0.40	0.06- 0.16	0.12- 0.29	0.22- 0.55	0.06- 0.15	0.06- 0.11	0.18- 0.34	0.02- 0.04
Sa1.5s	0.04- 0.09	0.08- 0.19	0.02- 0.05	0.04- 0.12	0.07- 0.20	0.03- 0.07	0.06- 0.15	0.11- 0.30	0.03- 0.08	0.04- 0.07	0.11- 0.21	0.01- 0.02
Sa2.0s	0.02- 0.06	0.05- 0.12	0.01- 0.03	0.02- 0.06	0.04- 0.10	0.01- 0.04	0.03- 0.09	0.06- 0.18	0.02- 0.05	0.01- 0.03	0.04- 0.08	0.00- 0.01

6.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD DE LOS EDIFICIOS

6.4.1 Método de Montecarlo para la asignación de vulnerabilidad

Como se mencionó en el apartado de *Exposición y Vulnerabilidad* del Capítulo 3, para tomar en cuenta la incertidumbre asociada a la aleatoriedad en la asignación de la vulnerabilidad se ha incorporado al cálculo un método estocástico de Montecarlo mediante la simulación de N números de muestras de distribución de vulnerabilidad.

El método Montecarlo es un método numérico que permite resolver problemas mediante la simulación de variables aleatorias. La importancia de este método se basa en la existencia de problemas que tienen difícil solución por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, pero que dependen de factores aleatorios o se pueden asociar a un modelo probabilística artificial (resolución de integrales de muchas variables, minimización de funciones, etc.).

En estos métodos el error es $\sim 1/\sqrt{N}$, donde N es el número de pruebas y, por tanto, ganar una cifra decimal en la precisión implica aumentar N en 100 veces. La base es la generación de números aleatorios.

Para aplicar este método a la asignación de vulnerabilidad dentro de la metodología de riesgo expuesta en esta tesis, se han realizado una serie de análisis estadísticos mediante la estimación del daño en edificios para distintas distribuciones de tipologías constructivas.

Como se expuso en el apartado de *Exposición y Vulnerabilidad*, para asignar las tipologías constructivas a la base de datos de edificios se aplica una matriz de transferencia con una distribución porcentual de tipologías constructivas por año de construcción. Sin embargo, a la hora de asignar estas tipologías constructivas a los edificios dentro de un mismo rango de edad, las mismas se asignan de manera aleatoria. Si dos edificios de la misma edad están ubicados sobre distintos tipos de suelo, la tipología constructiva asignada puede variar los resultados del daño. El fin de este análisis es cuantificar el error que se introduce por esta aleatoriedad en la asignación de vulnerabilidad.

Para ello, se realizará en primer lugar un análisis para tres distintas distribuciones porcentuales de tipologías:

- 85% Mampostería y 15% Hormigón armado

- 50% Mampostería y 50% Hormigón armado
- 15% Mampostería y 85% Hormigón armado

Para realizar las simulaciones se generan 100 muestras de edificios con tipologías constructivas asignadas de manera aleatoria, pero mantenido una misma distribución porcentual. Para cada una de estas muestras se realizará el cálculo del daño, obteniendo el número total de edificios con cada grado de daño. Se realizará entonces un análisis estadístico de cada distribución para conocer la variación en el número de edificios con cada grado de daño obtenido con las distintas muestras.

Para analizar también la sensibilidad del método al tamaño de la muestra, se realizarán simulaciones para una base de datos de 100 edificios, de 1000 edificios, de 2000 edificios y de 3000 edificios.

Para la generación de estas muestras se han utilizado las tipologías constructivas presentes en la región de Murcia, combinándose de forma aleatoria con espectros de demanda resultantes del estudio de peligrosidad probabilista anteriormente realizado, y distintos tipos de suelo.

Los resultados de daño en edificios, obtenidos en términos del número de edificios con cada grado de daño, para el caso de la asignación de tipologías con distribución de 85% edificios de mampostería y 15% edificios de hormigón armado y para un tamaño de muestra de 100 edificios, 1000 edificios, 2000 edificios y 3000 edificios, se muestra en la Figura 6.7.

Los resultados obtenidos, de esta misma manera, para las muestras con distribución de 50% edificios de mampostería y 50% edificios de hormigón armado, y para la distribución de 15% edificios de mampostería y 85% edificios de hormigón armado, pueden apreciarse en los gráficos mostrados en las Figura 6.8 y Figura 6.9.

Figura 6.7. Resultados de número de edificios con cada grado de daño para la distribución de tipologías constructivas de 85% mampostería y 15% hormigón armado en media/máximo/mínimo para las simulaciones realizadas con un tamaño de muestra de a) arriba izq.: 100 edificios, b) arriba der.: 1000 edificios, c) abajo izq.: 2000 edificios y d) abajo der.: 3000 edificios.

Figura 6.8. Resultados de número de edificios con cada grado de daño para la distribución de tipologías constructivas de 50% mampostería y 50% hormigón armado en media/máximo/mínimo para las simulaciones realizadas con un tamaño de muestra de a) arriba izq.: 100 edificios, b) arriba der.: 1000 edificios, c) abajo izq.: 2000 edificios y d) abajo der.: 3000 edificios.

Figura 6.9. Resultados de número de edificios con cada grado de daño para la distribución de tipologías constructivas de 15% mampostería y 85% hormigón armado en media/máximo/mínimo para las simulaciones realizadas con un tamaño de muestra de a) arriba izq.: 100 edificios, b) arriba der.: 1000 edificios, c) abajo izq.: 2000 edificios y d) abajo der.: 3000 edificios.

De los resultados de las simulaciones se observa que existe una apreciable variabilidad entre los valores máximos y mínimos de edificios con cada grado de de daño, y que esta variabilidad se mantiene para cada una de las distribuciones de tipologías constructivas consideradas, así como para los distintos tamaños de las muestras (100, 1000, 2000 y 3000 edificios).

También se aprecia que el reparto de daños (en función del grado de daño: nulo, leve, moderado, extenso y completo) para cada una de las distribuciones de tipologías es cuantitativamente distinto en función del número de edificios de la muestra, sin embargo, la tendencia en el reparto de daños se mantiene similar.

6.4.2 Test de normalidad Kolmogorov-Smirnov

Dada la aleatoriedad en las asignaciones de los pares espectro demanda/tipología constructiva se analiza si las muestras de resultados de las simulaciones se ajustan a una distribución de probabilidad. Esto permite evaluar la precisión de la metodología de cálculo de vulnerabilidad y riesgo en cuanto a la asignación de tipologías constructivas y espectros de demanda, dada su componente aleatoria. Dado que existe variabilidad en cuanto al rango máximo-mínimos de las distintas simulaciones, como se ha comprobado en las Figura 6.7, Figura 6.8 y Figura 6.9, si aún así estos resultados se ajustan a un tipo de distribución dado, se podrá evaluar el error introducido al cálculo a través de los factores estadísticos de la distribución ajustada.

Para verificar si los resultados se ajustan a una distribución normal, se empleará el método Kolmogorov-Smirnov (K-S) (Kolmogorov 1933, Stephens 1992). Para ello se evaluará la diferencia entre la frecuencia observada relativa acumulada con la frecuencia esperada relativa acumulada, comparando con los valores tabulados del factor kolmogorov-smirnov, seleccionados con un valor de significación de 0.05.

Los resultados de la validación de normalidad obtenidos aplicando el test de K-S a todas las simulaciones de estimación de daños realizadas para la distribución de tipologías de 85% edificios de mampostería y 15% edificios de hormigón armado, la distribución de 50% edificios de mampostería y 50% edificios de hormigón armado, y para la distribución de 15% edificios de mampostería y 85% edificios de hormigón armado se muestran en las Figura 6.10, Figura 6.11 y Figura 6.12, respectivamente.

De los resultados del test K-S se desprende la bondad de ajuste de todas las simulaciones con una distribución normal con un factor de significancia de 0.05.

Tras el estudio de la influencia de la distribución de la tipologías constructivas, así como el número de edificios en las muestras, se ha observado que en todos los casos se sigue el mismo patrón de normalidad, como distribución estadística de probabilidad, lo que permite evaluar a través de la media y otros parámetros estadísticos (desviación estándar, etc), en cada caso la precisión/error debido a la asignación aleatoria de vulnerabilidad. Por tanto, de acuerdo a las observaciones las muestras se ajustan a una distribución normal con un factor de significancia de 0.05, con independencia tanto del tipo de distribución de tipologías constructivas así como del número de edificios incluidos en las muestras.

Figura 6.10. Resultados de validación de normalidad por test de Kolmogorov-Smirnov para la distribución de tipologías constructivas de 85% mampostería y 15% hormigón armado para las simulaciones realizadas con un tamaño de muestra de a) arriba izq.: 100 edificios, b) arriba der.: 1000 edificios, c) abajo izq.: 2000 edificios y d) abajo der.: 3000 edificios.

Figura 6.11. Resultados de validación de normalidad por test de Kolmogorov-Smirnov para la distribución de tipologías constructivas de 50% mampostería y 50% hormigón armado para las simulaciones realizadas con un tamaño de muestra de a) arriba izq.: 100 edificios, b) arriba der.: 1000 edificios, c) abajo izq.: 2000 edificios y d) abajo der.: 3000 edificios.

Figura 6.12. Resultados de validación de normalidad por test de Kolmogorov-Smirnov para la distribución de tipologías constructivas de 15% mampostería y 85% hormigón armado para cada tipología de daño para las simulaciones realizadas con un tamaño de muestra de a) arriba izq.: 100 edificios, b) arriba der.: 1000 edificios y c) abajo izq.: 2000 edificios.

Asimismo, se han utilizado otros métodos gráficos para cada una de las simulaciones; en primer lugar, a través de gráficos P-P Plot (del inglés, *Probability–Probability Plot*), en el cual se representan los cuantiles de la distribución teórica supuesta frente a los cuantiles de la distribución empírica, y por otra parte, mediante la comparación de histogramas entre los resultados teóricos de la distribución a comparar, y los datos empíricos, con un resultado igualmente positivo de bondad de ajuste a una distribución normal.

Mediante los gráficos P-P Plot, como el mostrado en la Figura 6.13, se ha comprobado la normalidad de la distribución de muestras de las 100 simulaciones de cada caso, dibujando los 100 puntos con los cuantiles de la distribución normal. Al ser la distribución de la variable la misma que la distribución de comparación, es decir, que la distribución normal, se ha obtenido aproximadamente una línea recta, especialmente cerca de su centro.

A través de la comparación de histogramas, como el representado en la Figura 6.14, igualmente se ha observado de manera gráfica el resultado positivo de la bondad de ajuste a una distribución normal con un factor de significancia de 0.05 en todos los casos comparados.

Figura 6.13. Gráfico P-P Plot para bondad de ajuste de normalidad de la distribución de tipologías constructivas de 15% mampostería y 85% hormigón armado, para edificios con daño extenso, obtenido de las simulaciones realizadas con un tamaño de muestra de 2000 edificios.

Figura 6.14. Histograma para bondad de ajuste de normalidad para la distribución de tipologías constructivas de 50% mampostería y 50% hormigón armado para edificios con daño completo, para las simulaciones realizadas con un tamaño de muestra de 1000 edificios.

6.4.3 Estadística del muestreo

En las siguientes tablas se presentan los parámetros estadísticos de los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad para cada uno de los grados de daños, comparando entre las distintas distribuciones de tipologías constructivas y el número de edificios considerados en las muestras de cada análisis llevado a cabo.

La Tabla 6-6 muestra los valores estadísticos observados para los edificios con daño nulo obtenidos de las simulaciones realizadas para las tres distribuciones de tipologías constructivas consideradas, con tamaño de muestras de 100 a 10000 edificios.

En la Tabla 6-7 se muestran los parámetros estadísticos obtenidos para los edificios con daño leve resultantes de las simulaciones realizadas para estas distribuciones, con tamaño de muestras de 100 a 3000 edificios. La Tabla 6-8, Tabla 6-9 y Tabla 6-10 muestran la estadística descriptiva de los edificios resultantes con daño moderado, daño extenso y daño completo, respectivamente, para las mismas simulaciones y tamaños de muestras descritos.

Analizando la estadística de los resultados, en el caso de los edificios con daño completo (Tabla 6-10), por ejemplo, para la distribución de tipologías constructivas de 85% Mampostería y 15% Hormigón armado y un tamaño de muestra de 100 edificios, la media de edificios con daño completo es de 32.16 edificios y el rango entre el valor máximo obtenido (34.77 edificios) y el valor mínimo (27.66 edificios) es de 7.11%. Sin embargo, en este mismo análisis, considerando la misma distribución de tipologías constructivas para un tamaño de muestra de 3000 edificios, el rango de variación de edificios es de 22.49 edificios (0.75%).

De los valores mostrados para el resto de grados de daños, se extraen conclusiones similares. Por otra parte, en todos los casos se observan valores de curtosis y asimetría cercanos a 0.

Tomando como ejemplo el mismo caso anterior de distribución de tipologías constructivas de 85% mampostería y 15% hormigón armado, pero para el grado de daño extenso, el posible error máximo debido a la asignación aleatoria de vulnerabilidad para una muestra de 100 edificios es 2.51%, mientras que para una muestra de 3000 edificios es de 0.34%. Por tanto, se observa que si bien la tendencia en cuanto al máximo error posible es similar, considerando el mismo tamaño de la muestra e idéntica distribución de tipologías constructivas, los valores varían ligeramente para cada grado de daño considerado.

Los rangos de confianza de todos los resultados para el 95%, 99% y media, en función del número de edificios, para las tres distribuciones de tipologías constructivas consideradas, se muestran gráficamente en la Figura 6.15 para los edificios con daño completo, en la Figura 6.17 para los edificios con daño moderado y extenso, y en la Figura 6.16 para los edificios con daño leve y sin daños.

Analizando los gráficos mostrados en la Figura 6.15, dada una distribución de tipologías constructivas, si se compara la media con los valores máximos y mínimos obtenidos para los radios de confianza de 95% y 99% (2σ y 3σ , respectivamente) y para distintos tamaños de muestras, se observa la tendencia de que cuando el tamaño de la muestra de edificios aumenta, disminuye la variabilidad y, por tanto, el máximo error posible debido a la asignación aleatoria de vulnerabilidad. Se aprecia también que a partir de 2000 edificios el valor porcentual de grado de daño completo apenas tiene variación en cuanto a la media, y que el posible error máximo debido a la asignación aleatoria de vulnerabilidad puede considerarse no significativo.

Semejantes observaciones se extraen del análisis para el resto de grados de daño, mostrados en el resto de las figuras señaladas.

Tabla 6-6. Valores estadísticos observados para los edificios con daño nulo resultantes de las simulaciones realizadas para las distintas distribuciones de tipologías constructivas con tamaño de muestras de 100 a 3000 edificios.

	85% MAMPOSTERÍA Y 15% HORMIGÓN ARMADO				50% MAMPOSTERÍA Y 50% HORMIGÓN ARMADO				15% MAMPOSTERÍA Y 85% HORMIGÓN ARMADO			
Tamaño muestra (edificios)	100	1000	2000	3000	100	1000	2000	3000	100	500	1000	2000
Media	8.18	99.82	197.51	299.00	24.61	266.26	532.93	799.91	35.50	177.40	369.16	738.22
Error típico	0.07	0.20	0.36	0.36	0.07	0.16	0.26	0.29	0.06	0.12	0.15	0.23
Mediana	8.20	100.01	197.62	298.83	24.65	266.28	532.70	800.14	35.57	177.44	369.16	738.23
Desviación estándar	0.68	1.98	3.61	3.59	0.68	1.59	2.58	2.85	0.61	1.19	1.55	2.33
Varianza de la muestra	0.46	3.93	13.07	12.88	0.46	2.52	6.67	8.15	0.37	1.41	2.40	5.43
Curtosis	-0.29	-0.62	-0.40	-0.50	0.09	-0.26	0.76	0.12	0.31	0.27	-0.51	0.62
Coefficiente de asimetría	-0.15	-0.13	0.03	-0.22	-0.02	-0.16	0.49	-0.11	-0.32	0.20	0.11	-0.34
Rango	3.22	8.32	17.03	15.09	3.60	7.27	13.09	16.62	3.18	6.30	7.17	12.99
Mínimo	6.34	95.79	189.78	290.85	22.88	262.67	527.39	791.21	33.51	174.44	365.63	731.16
Máximo	9.55	104.11	206.81	305.94	26.48	269.94	540.48	807.84	36.69	180.74	372.81	744.16
Suma	818.27	9981.51	19750.97	29899.51	2460.71	26626.15	53292.77	79990.86	3549.77	17740.19	36915.54	73821.99
Cuenta	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mayor (1)	9.55	104.11	206.81	305.94	26.48	269.94	540.48	807.84	36.69	180.74	372.81	744.16
Menor(1)	6.34	95.79	189.78	290.85	22.88	262.67	527.39	791.21	33.51	174.44	365.63	731.16
Radio (confianza 95%)	0.13	0.12	0.16	0.13	0.13	0.10	0.11	0.10	0.12	0.10	0.10	0.10
Valor máximo (95%)	8.32	99.94	197.67	299.12	24.74	266.36	533.04	800.01	35.62	177.51	369.25	738.32
% Valor máximo (95%)	8.32%	9.99%	9.88%	9.97%	24.74%	26.64%	26.65%	26.67%	35.62%	35.50%	36.93%	36.92%
Valor mínimo (95%)	8.05	99.69	197.35	298.87	24.47	266.16	532.81	799.81	35.38	177.30	369.06	738.12
% Valor mínimo (95%)	8.05%	9.97%	9.87%	9.96%	24.47%	26.62%	26.64%	26.66%	35.38%	35.46%	36.91%	36.91%
Radio (confianza 99%)	0.18	0.16	0.21	0.17	0.18	0.13	0.15	0.13	0.16	0.14	0.13	0.13
Valor máximo (99%)	8.36	99.98	197.72	299.16	24.78	266.39	533.08	800.04	35.65	177.54	369.28	738.35
% Valor máximo (99%)	8.36%	10.00%	9.89%	9.97%	24.78%	26.64%	26.65%	26.67%	35.65%	35.51%	36.93%	36.92%
Valor mínimo (99%)	8.01	99.65	197.30	298.83	24.43	266.13	532.78	799.77	35.34	177.27	369.03	738.09
% Valor mínimo (99%)	8.01%	9.97%	9.87%	9.96%	24.43%	26.61%	26.64%	26.66%	35.34%	35.45%	36.90%	36.90%
% media	8.18%	9.98%	9.88%	9.97%	24.61%	26.63%	26.65%	26.66%	35.50%	35.48%	36.92%	36.91%

Tabla 6-7. Valores estadísticos observados para los edificios con daño leve resultantes de las simulaciones realizadas para las distintas distribuciones de tipologías constructivas con tamaño de muestras de 100 a 3000 edificios.

	85% MAMPOSTERÍA Y 15% HORMIGÓN ARMADO				50% MAMPOSTERÍA Y 50% HORMIGÓN ARMADO				15% MAMPOSTERÍA Y 85% HORMIGÓN ARMADO			
Tamaño muestra (edificios)	100	1000	2000	3000	100	1000	2000	3000	100	500	1000	2000
Media	17.15	204.38	407.22	612.36	24.22	261.31	522.49	783.47	24.03	120.05	251.50	502.98
Error típico	0.10	0.20	0.32	0.38	0.07	0.21	0.34	0.35	0.06	0.14	0.19	0.25
Mediana	17.06	204.14	407.43	611.69	24.15	261.51	522.73	783.66	24.01	120.13	251.39	502.80
Desviación estándar	1.04	1.96	3.21	3.81	0.72	2.11	3.40	3.48	0.57	1.35	1.86	2.52
Varianza de la muestra	1.08	3.84	10.28	14.49	0.52	4.46	11.55	12.13	0.32	1.83	3.47	6.35
Curtosis	-0.53	-0.28	0.12	-0.26	0.29	-0.35	0.26	-0.09	-0.50	-0.53	-0.24	-0.17
Coefficiente de asimetría	0.32	0.39	-0.20	0.18	0.27	-0.24	-0.13	-0.17	0.21	-0.24	0.02	0.32
Rango	4.30	8.70	17.38	18.28	4.09	9.67	17.47	18.64	2.52	5.95	8.96	12.91
Mínimo	15.16	200.38	396.84	603.13	22.44	256.01	514.01	774.03	22.86	117.01	246.79	496.56
Máximo	19.47	209.08	414.23	621.41	26.53	265.68	531.48	792.67	25.39	122.96	255.75	509.47
Suma	1715.23	20437.70	40722.50	61235.61	2422.41	26130.53	52249.44	78347.17	2402.99	12004.59	25149.98	50298.41
Cuenta	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mayor (1)	19.47	209.08	414.23	621.41	26.53	265.68	531.48	792.67	25.39	122.96	255.75	509.47
Menor(1)	15.16	200.38	396.84	603.13	22.44	256.01	514.01	774.03	22.86	117.01	246.79	496.56
Radio (confianza 95%)	0.20	0.12	0.14	0.14	0.14	0.13	0.15	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11
Valor máximo (95%)	17.36	204.50	407.37	612.49	24.37	261.44	522.64	783.60	24.14	120.16	251.62	503.09
% Valor máximo (95%)	17.36%	20.45%	20.37%	20.42%	24.37%	26.14%	26.13%	26.12%	24.14%	24.03%	25.16%	25.15%
Valor mínimo (95%)	16.95	204.26	407.08	612.22	24.08	261.17	522.35	783.35	23.92	119.93	251.38	502.87
% Valor mínimo (95%)	16.95%	20.43%	20.35%	20.41%	24.08%	26.12%	26.12%	26.11%	23.92%	23.99%	25.14%	25.14%
Radio (confianza 99%)	0.27	0.16	0.18	0.18	0.19	0.17	0.20	0.16	0.15	0.16	0.15	0.15
Valor máximo (99%)	17.42	204.54	407.41	612.54	24.41	261.48	522.69	783.64	24.18	120.20	251.65	503.13
% Valor máximo (99%)	17.42%	20.45%	20.37%	20.42%	24.41%	26.15%	26.13%	26.12%	24.18%	24.04%	25.17%	25.16%
Valor mínimo (99%)	16.88	204.22	407.04	612.18	24.04	261.13	522.30	783.31	23.88	119.89	251.35	502.84
% Valor mínimo (99%)	16.88%	20.42%	20.35%	20.41%	24.04%	26.11%	26.11%	26.11%	23.88%	23.98%	25.13%	25.14%
% media	17.15%	20.44%	20.36%	20.41%	24.22%	26.13%	26.12%	26.12%	24.03%	24.01%	25.15%	25.15%

Tabla 6-8. Valores estadísticos observados para los edificios con daño moderado resultantes de las simulaciones realizadas para las distintas distribuciones de tipologías constructivas con tamaño de muestras de 100 a 3000 edificios.

	85% MAMPOSTERÍA Y 15% HORMIGÓN ARMADO				50% MAMPOSTERÍA Y 50% HORMIGÓN ARMADO				15% MAMPOSTERÍA Y 85% HORMIGÓN ARMADO			
Tamaño muestra (edificios)	100	1000	2000	3000	100	1000	2000	3000	100	500	1000	2000
Media	23.10	248.98	500.36	747.68	25.44	261.12	521.94	782.94	23.05	115.43	231.16	462.45
Error típico	0.09	0.28	0.43	0.46	0.08	0.17	0.28	0.33	0.07	0.14	0.15	0.23
Mediana	23.04	248.95	500.47	747.60	25.39	261.08	521.91	782.63	23.02	115.24	231.29	462.30
Desviación estándar	0.90	2.83	4.29	4.60	0.81	1.69	2.77	3.28	0.74	1.39	1.54	2.32
Varianza de la muestra	0.81	7.99	18.37	21.16	0.65	2.87	7.65	10.73	0.55	1.93	2.37	5.40
Curtosis	-0.01	-0.57	-0.20	-0.22	0.01	-0.31	0.42	-0.51	0.30	0.13	-0.71	0.16
Coeficiente de asimetría	0.35	0.08	-0.33	0.22	-0.16	0.27	-0.13	0.15	0.33	-0.16	-0.16	0.30
Rango	4.77	13.36	19.88	21.03	4.33	7.39	14.53	16.52	3.81	6.82	6.64	11.73
Mínimo	21.03	242.09	488.85	738.23	22.96	257.88	514.08	774.47	21.63	111.74	227.80	457.33
Máximo	25.79	255.45	508.73	759.27	27.29	265.27	528.62	790.98	25.45	118.56	234.45	469.06
Suma	2310.08	24898.24	50036.43	74768.18	2543.88	26112.14	52194.43	78293.94	2305.36	11542.57	23115.94	46244.98
Cuenta	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mayor (1)	25.79	255.45	508.73	759.27	27.29	265.27	528.62	790.98	25.45	118.56	234.45	469.06
Menor(1)	21.03	242.09	488.85	738.23	22.96	257.88	514.08	774.47	21.63	111.74	227.80	457.33
Radio (confianza 95%)	0.18	0.18	0.19	0.16	0.16	0.11	0.12	0.12	0.15	0.12	0.10	0.10
Valor máximo (95%)	23.28	249.16	500.55	747.85	25.60	261.23	522.07	783.06	23.20	115.55	231.25	462.55
% Valor máximo (95%)	23.28%	24.92%	25.03%	24.93%	25.60%	26.12%	26.10%	26.10%	23.20%	23.11%	23.13%	23.13%
Valor mínimo (95%)	22.92	248.81	500.18	747.52	25.28	261.02	521.82	782.82	22.91	115.30	231.06	462.35
% Valor mínimo (95%)	22.92%	24.88%	25.01%	24.92%	25.28%	26.10%	26.09%	26.09%	22.91%	23.06%	23.11%	23.12%
Radio (confianza 99%)	0.23	0.23	0.25	0.22	0.21	0.14	0.16	0.15	0.19	0.16	0.13	0.13
Valor máximo (99%)	23.33	249.21	500.61	747.90	25.65	261.26	522.10	783.09	23.24	115.59	231.28	462.58
% Valor máximo (99%)	23.33%	24.92%	25.03%	24.93%	25.65%	26.13%	26.11%	26.10%	23.24%	23.12%	23.13%	23.13%
Valor mínimo (99%)	22.87	248.75	500.12	747.47	25.23	260.98	521.78	782.79	22.86	115.27	231.03	462.32
% Valor mínimo (99%)	22.87%	24.88%	25.01%	24.92%	25.23%	26.10%	26.09%	26.09%	22.86%	23.05%	23.10%	23.12%
% media	23.10%	24.90%	25.02%	24.92%	25.44%	26.11%	26.10%	26.10%	23.05%	23.09%	23.12%	23.12%

Tabla 6-9. Valores estadísticos observados para los edificios con daño extenso obtenidos de las simulaciones realizadas para las distintas distribuciones de tipologías constructivas con tamaño de muestras de 100 a 3000 edificios.

	85% MAMPOSTERÍA Y 15% HORMIGÓN ARMADO				50% MAMPOSTERÍA Y 50% HORMIGÓN ARMADO				15% MAMPOSTERÍA Y 85% HORMIGÓN ARMADO			
Tamaño muestra	100	1000	2000	3000	100	1000	2000	3000	100	500	1000	2000
Media	19.40	192.84	388.38	579.62	14.67	135.41	270.78	406.12	11.44	57.11	103.74	207.40
Error típico	0.09	0.26	0.45	0.39	0.05	0.12	0.16	0.19	0.04	0.09	0.11	0.17
Mediana	19.38	192.81	388.63	579.54	14.73	135.41	270.77	406.15	11.52	57.05	103.74	207.39
Desviación estándar	0.88	2.61	4.54	3.90	0.52	1.18	1.56	1.93	0.41	0.93	1.08	1.74
Varianza de la muestra	0.77	6.81	20.63	15.20	0.27	1.39	2.45	3.74	0.16	0.87	1.17	3.01
Curtosis	0.76	-0.54	-0.11	-0.11	-0.37	-0.31	0.11	0.06	-0.46	-0.21	-0.24	-0.13
Coefficiente de asimetría	0.30	-0.06	-0.32	-0.08	-0.38	0.10	0.16	0.08	-0.26	-0.24	-0.17	0.28
Rango	5.02	11.44	21.18	20.24	2.17	5.61	7.93	10.13	2.03	4.57	4.99	8.89
Mínimo	16.85	186.78	376.71	568.52	13.49	132.85	267.05	401.00	10.40	54.42	101.01	202.89
Máximo	21.87	198.23	397.89	588.76	15.67	138.47	274.98	411.12	12.43	58.98	106.00	211.78
Suma	1940.17	19284.19	38837.54	57961.57	1467.17	13541.24	27078.44	40611.74	1144.42	5710.56	10374.18	20740.11
Cuenta	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mayor (1)	21.87	198.23	397.89	588.76	15.67	138.47	274.98	411.12	12.43	58.98	106.00	211.78
Menor(1)	16.85	186.78	376.71	568.52	13.49	132.85	267.05	401.00	10.40	54.42	101.01	202.89
Radio (confianza 95%)	0.17	0.16	0.20	0.14	0.10	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08
Valor máximo (95%)	1957.39%	19300.36%	38857.44%	57975.52%	1477.32%	13548.53%	27085.30%	40618.66%	1152.38%	5718.72%	10380.87%	20747.72%
% Valor máximo (95%)	0.20	0.19	0.19	0.19	0.15	0.14	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
Valor mínimo (95%)	1922.94%	19268.02%	38817.63%	57947.62%	1457.01%	13533.94%	27071.58%	40604.82%	1136.46%	5702.39%	10367.48%	20732.51%
% Valor mínimo (95%)	0.19	0.19	0.19	0.19	0.15	0.14	0.14	0.14	0.11	0.11	0.10	0.10
Radio (confianza 99%)	0.23	0.21	0.26	0.18	0.13	0.10	0.09	0.09	0.10	0.11	0.09	0.10
Valor máximo (99%)	1962.81%	19305.44%	38863.70%	57979.90%	1480.52%	13550.83%	27087.45%	40620.83%	1154.88%	5721.28%	10382.98%	20750.11%
% Valor máximo (99%)	0.20	0.19	0.19	0.19	0.15	0.14	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
Valor mínimo (99%)	1917.53%	19262.94%	38811.38%	57943.23%	1453.82%	13531.65%	27069.43%	40602.64%	1133.96%	5699.83%	10365.38%	20730.12%
% Valor mínimo (99%)	19.18%	19.26%	19.41%	19.31%	14.54%	13.53%	13.53%	13.53%	11.34%	11.40%	10.37%	10.37%
% media	19.40%	19.28%	19.42%	19.32%	14.67%	13.54%	13.54%	13.54%	11.44%	11.42%	10.37%	10.37%

Tabla 6-10. Valores estadísticos observados para lo edificios con daño completo obtenidos de las simulaciones realizadas para las distintas distribuciones de tipologías constructivas con tamaño de muestras de 100 a 10000 edificios.

	85% MAMPOSTERÍA Y 15% HORMIGÓN ARMADO					50% MAMPOSTERÍA Y 50% HORMIGÓN ARMADO					15% MAMPOSTERÍA Y 85% HORMIGÓN ARMADO				
Tamaño muestra (edificios)	100	1000	2000	3000	10000	100	1000	2000	3000	10000	100	500	1000	2000	10000
Media	32.16	253.98	506.22	761.35	2530.00	11.06	75.90	151.85	227.56	758.00	5.97	30.02	44.44	88.95	445.00
Error típico	0.17	0.35	0.45	0.53		0.09	0.20	0.33	0.35		0.07	0.14	0.17	0.22	
Mediana	32.70	254.20	505.80	761.09		11.08	76.17	151.68	227.61		6.05	29.99	44.44	89.01	
Desviación estándar	1.70	3.46	4.51	5.28	7.67	0.89	1.95	3.31	3.50	5.78	0.69	1.42	1.72	2.22	4.27
Varianza de la muestra	2.88	12.01	20.30	27.86		0.79	3.82	10.94	12.25		0.48	2.03	2.97	4.95	
Curtosis	-0.81	-0.33	0.05	-0.11		0.11	-0.57	1.27	-0.50		0.10	0.28	-0.26	-0.47	
Coeficiente de asimetría	-0.51	-0.14	0.47	-0.29		0.15	-0.01	0.05	0.17		-0.35	0.24	0.05	0.08	
Rango	7.11	16.15	20.60	22.49		4.83	8.93	20.94	15.07		3.24	7.08	7.80	9.43	
Mínimo	27.66	245.53	496.95	748.11		8.85	71.63	141.59	220.88		4.20	26.79	40.48	84.43	
Máximo	34.77	261.69	517.56	770.60		13.68	80.56	162.53	235.95		7.44	33.87	48.28	93.86	
Suma	3216.25	25398.36	50621.56	76135.13		1105.83	7589.94	15184.92	22756.28		597.46	3002.09	4444.37	8894.50	
Cuenta	100.00	100.00	100.00	100.00		100.00	100.00	100.00	100.00		100.00	100.00	100.00	100.00	
Mayor (1)	34.77	261.69	517.56	770.60		13.68	80.56	162.53	235.95		7.44	33.87	48.28	93.86	
Menor(1)	27.66	245.53	496.95	748.11		8.85	71.63	141.59	220.88		4.20	26.79	40.48	84.43	
Radio (confianza 95%)	0.33	0.21	0.20	0.19	0.15	0.17	0.12	0.14	0.13	0.11	0.14	0.12	0.11	0.10	0.08
Valor máximo (95%)	32.50	254.20	506.41	761.54	2530.15	11.23	76.02	151.99	227.69	758.11	6.11	30.15	44.55	89.04	445.08
% Valor máximo (95%)	32.50%	25.42%	25.32%	25.38%	25.30%	11.23%	7.60%	7.60%	7.59%	7.58%	6.11%	6.03%	4.46%	4.45%	4.45%
Valor mínimo (95%)	31.83	253.77	506.02	761.16	2529.85	10.88	75.78	151.70	227.44	757.89	5.84	29.90	44.34	88.85	444.92
% Valor mínimo (95%)	31.83%	25.38%	25.30%	25.37%	25.30%	10.88%	7.58%	7.59%	7.58%	7.58%	5.84%	5.98%	4.43%	4.44%	4.45%
Radio (confianza 99%)	0.44	0.28	0.26	0.25	0.20	0.23	0.16	0.19	0.16	0.15	0.18	0.16	0.14	0.13	0.11
Valor máximo (99%)	32.60	254.27	506.48	761.60	2530.20	11.29	76.06	152.04	227.73	758.15	6.15	30.19	44.58	89.07	445.11
% Valor máximo (99%)	32.60%	25.43%	25.32%	25.39%	25.30%	11.29%	7.61%	7.60%	7.59%	7.58%	6.15%	6.04%	4.46%	4.45%	4.45%
Valor mínimo (99%)	31.73	253.70	505.96	761.10	2529.80	10.83	75.74	151.66	227.40	757.85	5.80	29.86	44.30	88.82	444.89
% Valor mínimo (99%)	31.73%	25.37%	25.30%	25.37%	25.30%	10.83%	7.57%	7.58%	7.58%	7.58%	5.80%	5.97%	4.43%	4.44%	4.45%
% media	32.16%	25.40%	25.31%	25.38%	25.30%	11.06%	7.59%	7.59%	7.59%	7.58%	5.97%	6.00%	4.44%	4.45%	4.45%

Figura 6.15. Rango de confianza (95% y 99%) y media en función del número de edificios para las distribuciones de tipología constructiva con resultados de daño completo.

Figura 6.16: Rango de confianza (95% y 99%) y media en función del número de edificios para las distribuciones de tipología constructiva con resultados de daño moderado y daño extenso.

Figura 6.17. Rango de confianza (95% y 99%) y media en función del número de edificios para las distribuciones de tipología constructivas con resultados de daño leve y sin daños.

Tal como se muestra en las gráficas, la variación en el número de edificios obtenido con cada grado de daño, a partir de tamaños de muestras mayores a 2000, es prácticamente insignificante. Por tanto, los resultados obtenidos de este análisis señalan que para bases de datos con un gran número de edificios (mayores a 2000 en este caso), la aleatoriedad en la asignación de tipologías constructivas no tiene influencia en los resultados de daño, por lo cual puede despreciarse, siempre y cuando se cuente con una distribución porcentual de tipologías fiable. Por otro lado, el análisis demuestra la importancia de tener en cuenta esta aleatoriedad cuando la base de datos de edificios es pequeña (especialmente menor a 500).

6.4.4 Test de normalidad K-S para el caso de estudio de Lorca

Se ha realizado el test de evaluación de normalidad K-S (Kolmogorov-Smirnov) para las distintas ramas del árbol lógico elaborado para el caso de estudio del escenario de daños de PR475 en la ciudad de Lorca.

Se realizaron simulaciones de 100 muestras de los 6213 edificios que conforman el parque inmobiliario de Lorca y los tipos de suelo presentes en la ciudad de Lorca.

Para todos los modelos de atenuación y métodos de capacidad-demanda utilizados, se ha realizado el análisis para verificar la bondad de ajuste a una distribución normal con el factor de significancia de 0.05, como se muestra en la Figura 6.18.

En la Tabla 6-11 se muestran los parámetros e índices estadísticos de los resultados obtenidos, en los cuales se confirma que dado que el tamaño de la muestra de edificios es superior a 2000 edificios, el máximo error posible debido a la asignación aleatoria de vulnerabilidad en todos los casos estudiados se reduce a un rango de error en porcentaje entre 0.03% y 0.21%. Las desviaciones estándar se ajustan a un rango entre 0.78 y 4.88 edificios.

Por otra parte en todos los casos se observan valores de curtosis y asimetría cercanos a 0, al igual que en los anteriores análisis de sensibilidad llevados a cabo.

Figura 6.18. Resultados de validación de normalidad mediante el test de Kolmogorov-Smirnov de la asignación de vulnerabilidad para el parque inmobiliario de Lorca considerando distintos modelos de atenuación y métodos capacidad-demanda.

Tabla 6-11. Valores estadísticos observados de distribución de daño para el parque inmobiliario de Lorca considerando distintos modelos de atenuación y métodos capacidad-demanda.

	MADR-ASK					MADR-CB					MADR-CY				
Grado de daño	COMPLETO	SIN DAÑOS	LEVE	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO	SIN DAÑOS	LEVE	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO	SIN DAÑOS	LEVE	MODERADO	EXTENSO
Media	485.01	1563.66	1487.79	1740.74	935.79	561.66	1142.56	1413.31	1939.88	1155.59	1755.41	724.73	847.46	1509.55	1375.84
Error típico	0.27	0.25	0.30	0.25	0.22	0.33	0.30	0.22	0.23	0.20	0.49	0.22	0.29	0.34	0.25
Mediana	484.81	1563.68	1487.46	1740.37	935.81	561.82	1142.82	1413.67	1939.90	1155.61	1755.55	724.75	847.28	1509.60	1375.70
Desviación estándar	2.68	2.46	2.97	2.51	2.18	3.34	3.02	2.20	2.31	2.01	4.88	2.24	2.93	3.40	2.55
Varianza de la muestra	7.18	6.08	8.83	6.30	4.77	11.17	9.09	4.86	5.35	4.02	23.81	5.01	8.58	11.54	6.49
Curtosis	0.38	0.22	-0.11	-0.41	-0.52	-0.03	1.72	0.44	-0.69	1.31	0.15	-0.08	0.13	0.01	0.75
Coefficiente de asimetría	0.06	-0.26	0.22	0.18	-0.04	0.03	-0.68	-0.33	0.08	0.25	-0.23	0.01	0.18	0.03	0.52
Rango	15.49	13.25	14.52	12.00	9.15	16.95	18.36	12.30	9.51	12.51	26.63	11.12	14.37	17.54	13.24
Mínimo	476.69	1555.52	1481.12	1735.23	931.38	553.88	1130.45	1406.85	1935.29	1150.06	1739.63	718.22	840.89	1502.01	1370.56
Máximo	492.18	1568.78	1495.64	1747.23	940.53	570.83	1148.81	1419.15	1944.80	1162.58	1766.26	729.34	855.26	1519.55	1383.80
Suma	48501.48	156366.14	148778.70	174074.47	93579.22	56166.02	114255.52	141331.31	193988.46	115558.69	175541.35	72473.19	84745.91	150955.47	137584.08
Simulaciones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Nivel de confianza(95.0%)	0.53	0.49	0.59	0.50	0.43	0.66	0.60	0.44	0.46	0.40	0.97	0.44	0.58	0.67	0.51
% Media	7.81%	25.17%	23.95%	28.02%	15.06%	9.04%	18.39%	22.75%	31.22%	18.60%	28.25%	11.66%	13.64%	24.30%	22.14%
% Máx. Error Aleatoriedad	0.12%	0.11%	0.12%	0.10%	0.07%	0.14%	0.15%	0.10%	0.08%	0.10%	0.21%	0.09%	0.12%	0.14%	0.11%
	IDCM-ASK					IDCM-CB					IDCM-CY				
Grado de daño	COMPLETO	SIN DAÑOS	LEVE	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO	SIN DAÑOS	LEVE	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO	SIN DAÑOS	LEVE	MODERADO	EXTENSO
Media	383.01	1679.31	1558.19	1731.96	859.12	150.41	1788.78	1955.54	1670.95	645.91	1252.61	735.77	967.66	1777.75	1477.79
Error típico	0.20	0.18	0.21	0.22	0.16	0.08	0.18	0.08	0.13	0.09	0.19	0.22	0.20	0.20	0.19
Mediana	382.79	1679.45	1558.37	1731.95	859.12	150.48	1788.80	1955.53	1670.84	645.85	1252.63	735.68	967.87	1777.58	1477.65
Desviación estándar	2.05	1.79	2.15	2.22	1.59	0.84	1.80	0.78	1.34	0.88	1.91	2.24	2.00	2.01	1.89
Varianza de la muestra	4.20	3.21	4.61	4.94	2.53	0.70	3.23	0.60	1.79	0.77	3.64	5.01	3.98	4.04	3.58
Curtosis	-0.39	1.15	0.59	-0.32	0.06	-0.45	1.70	-0.33	-0.07	-0.14	0.11	-0.20	0.53	0.68	-0.44
Coefficiente de asimetría	0.10	-0.63	0.16	0.03	0.06	-0.19	-0.68	0.10	0.37	0.17	-0.14	-0.12	0.17	-0.01	-0.04
Rango	10.08	11.04	11.78	11.19	8.04	4.00	11.02	3.67	7.09	4.06	10.39	10.90	10.55	12.02	8.56
Mínimo	377.99	1672.80	1553.25	1725.67	855.05	148.24	1781.53	1953.87	1667.64	643.98	1247.10	729.42	963.31	1771.59	1473.19
Máximo	388.07	1683.84	1565.03	1736.86	863.09	152.25	1792.55	1957.54	1674.72	648.04	1257.50	740.31	973.85	1783.61	1481.75
Suma	38300.57	167930.91	155818.67	173195.65	85912.20	15040.70	178877.94	195553.50	167094.51	64591.35	125261.35	73576.77	96765.82	177774.67	147779.40
Simulaciones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Nivel de confianza(95.0%)	0.41	0.36	0.43	0.44	0.32	0.17	0.36	0.15	0.27	0.17	0.38	0.44	0.40	0.40	0.38
% Media	6.16%	27.03%	25.08%	27.88%	13.83%	2.42%	28.79%	31.47%	26.89%	10.40%	20.16%	11.84%	15.57%	28.61%	23.79%
% Máx. Error Aleatoriedad	0.08%	0.09%	0.09%	0.09%	0.06%	0.03%	0.09%	0.03%	0.06%	0.03%	0.08%	0.09%	0.08%	0.10%	0.07%

6.4.5 Software desarrollado para la estimación del daño en edificios

Para llevar a cabo el gran número de simulaciones de estimación de daños realizadas y como contribución de esta tesis, se ha desarrollado un programa de cálculo de daño en edificios utilizando los métodos de capacidad-demanda I-DCM y MADRS. Este software, nombrado DAMMUM, ha sido programado en lenguaje VisualBasic y presenta una interfaz amigable para la carga de inputs para el cálculo, selección de curvas de capacidad y fragilidad, cálculo y descarga de resultados. Este programa se ha llevado a cabo con la intención de ser un software libre que facilite la estimación de daños mediante métodos analíticos, uno de ellos iterativo, de una forma rápida, para cualquier unidad de trabajo que se desee utilizar y compatible con los sistemas operativos y herramientas generalmente utilizados, como son Microsoft Windows y Microsoft Office Excel.

Entre las ventajas que ofrece este software con respecto a otros software desarrollados con el mismo fin son:

- Instalación rápida en Windows 7, 8 o 10 mediante un archivo ejecutable, por lo que no necesita de otro programa para su funcionamiento.
- Posee interfaz gráfica, no necesita ningún tipo de código o programación para su utilización.
- La base de datos de registros de entrada es introducida a través del programa Excel, por lo que el límite de unidades de trabajo depende del límite de filas de Excel, que consiste en un máximo de 120000 filas de registros, pudiendo llegar entonces a realizar cálculos de estimación de daños para cada edificio, hasta un total de 120000 edificios en una sola ejecución. Otros programas están diseñados para trabajar con geounidades, estableciendo límites menores a 5000 unidades como máximo para una ejecución.
- El Excel también ofrece como ventaja más facilidad para preparar la base de datos de edificios y espectros de demanda de entrada al cálculo.
- El instalador del programa crea por defecto dos archivos .xlsx con los parámetros de los espectros de capacidad y curvas de fragilidad de las metodologías Hazus, Risk-UE y L&G(2006), junto a una pestaña en blanco preparada para introducir otros valores de espectros y curvas que se deseen utilizar.

- Los resultados son cargados directamente a un fichero Excel que contiene los mismos datos de la base de datos de entrada, con las nuevas columnas de desplazamiento en el punto de desempeño y porcentajes de grados de daño calculados.

Como datos de entrada para el cálculo, el programa DAMMUM requiere una base de datos de edificaciones con una primera columna correspondiente al ID o referencia catastral de la unidad de trabajo o edificio, una columna con el tipo de suelo según FEMA, una tercera columna con la tipología constructiva de la unidad de trabajo (si una unidad de trabajo posee más de una tipología, cada una de ellas debe estar contenida en una fila diferente) y nueve columnas correspondientes al espectro de demanda para la unidad de trabajo dado para los periodos de PGA, Sa(0.1s), Sa(0.2s), Sa(0.3s), Sa(0.5s), Sa(0.75s), Sa(1s), Sa(1.5s) y Sa(2s).

La Figura 6.19 muestra la interfaz gráfica de apertura del programa, donde el usuario podrá elegir el método que desee utilizar para el cálculo de porcentajes de daño. La Figura 6.20 muestra la ventana de entrada de datos, donde el usuario podrá cargar la base de datos, seleccionar los espectros y curvas de capacidad y fragilidad (Figura 6.21), y a través de los botones mostrados en la parte superior derecha, el usuario puede calcular y exportar los resultados. Los resultados del cálculo estarán dados por el desplazamiento en el punto de desempeño de cada tipología constructiva con respecto al espectro de demanda dado, y el porcentaje de alcanzar cada grado de daño. Esos resultados se anexarán a la base de datos inicial en 6 nuevas columnas, y la base de datos será exportada directamente a un fichero Excel, a través de una ventana en la que el usuario podrá elegir el directorio y nombre de archivo que desee para guardar el fichero de resultados.

Figura 6.19. Interfaz gráfica de entrada al programa DAMMUM, en la cual se elige el método analítico a utilizar para la estimación de daños.

Figura 6.20. Ventana del programa DAMMUM con los botones para cargar la base de datos, seleccionar los espectros de capacidad y curvas de fragilidad, y los botones para dar inicio al cálculo, exportar los resultados a Excel o copiarlos a otro fichero.

Figura 6.21. Ventana para seleccionar los espectros de capacidad de las metodologías Risk-UE, Hazus o L&G(2006), contenidas por defecto en el programa, o cargar otros valores de espectros a través de la pestaña "Other capacity spectrums".

6.5 COMPARACIÓN DE LOS DAÑOS OBTENIDOS DEL ESCENARIO PR475 CON LOS DAÑOS OBSERVADOS EN LORCA

6.5.1 Resultados por modelo de atenuación y método capacidad-demanda

En primer lugar se ha realizado una comparación de los resultados de daño obtenidos con:

- 1) Los tres modelos de atenuación que mejor reproducen las aceleraciones registradas en el terremoto de Lorca (ASK13, CB13 y CY13)
- 2) Los dos métodos analíticos utilizados para el cálculo del punto de desempeño (I-DCM y MADRS) y posterior estimación de grados de daño.

Los resultados de la estimación de daños en edificios obtenidos de la simulación con los tres modelos de atenuación y los dos métodos de capacidad-demanda mencionados se muestran en la Figura 6.22. Estos cálculos se han realizado en primer lugar para los valores medios de aceleración obtenidos con cada modelo de atenuación.

Tal como se observa en las gráficas mostradas en la Figura 6.22, los resultados de daño presentan mayor variabilidad dependiendo del modelo de atenuación que del método capacidad-demanda, lo que significa que el método en sí es menos sensible a los resultados. Los modelos de ASK13 y CB13 muestran resultados más parecidos que los obtenidos con el método de CY13, presentando este último mayor número de edificios con daño extenso y completo, y por ende, menor número con daño nulo o leve. El grado de daño moderado es muy parecido en todos los casos.

Con respecto al método de capacidad-demanda utilizado únicamente se perciben variaciones significativas cuando éste se combina con el modelo CB13.

Figura 6.22. Resultados de números de edificios con diferentes grados de daños según el método I-DCM (arriba) y el método MADRS (abajo), según los modelos de atenuación de Abrahamson et al. (2013), Campbell y Bozorgnia (2013), Chiou y Youngs (2013), empleados en la simulación del sismo de Lorca de 2011.

Por otra parte, para analizar la influencia del sigma de los modelos en los resultados de daño, se realizó también un cálculo con los espectros específicos obtenidos con la desviación $\pm$ sigma de cada modelo de atenuación. La Figura 6.23 muestra los resultados en porcentaje de edificios con cada grado de daño obtenidos para los tres modelos de atenuación para la media μ y $\mu \pm \sigma$ de cada modelo.

Tal como muestra la Figura 6.23, el modelo que menor variación presenta en los resultados de daños para este caso es el modelo de CB13. El modelo de CY13 presenta una importante variación en los resultados de daño, pasando de un 5% de edificios con daño completo para el input sísmico de $\mu-\sigma$, a más de 50% de edificios con daño completo al utilizar los espectros $\mu+\sigma$, indicando que la alta variabilidad de este modelo puede afectar sobremanera los resultados de riesgo.

Figura 6.23. Resultados de daño (% de edificios con cada grado de daño) con los diferentes modelos de atenuación empleados en la simulación, para las aceleraciones medias y $\pm$ sigma de cada modelo, con el método I-DCM (arriba) y MADRS (abajo).

A continuación se realiza la estimación de daños siguiendo un árbol lógico con un nodo para los modelos de atenuación, ponderando la media de cada modelo con un peso de 0.68 (según criterio de 68% de probabilidad asociada a los valores medios de una distribución normal) y los valores $\pm$ sigma de cada modelo con un peso de 0.32. Se obtienen los resultados mostrados en la Figura 6.24. Se aprecia en este caso globalmente la baja sensibilidad del método en los resultados de daño, más concretamente en el número de edificios que sufrirían cada grado.

Figura 6.24. Comparación de resultados de daño en edificios según el método I-DCM y el método MADRS, combinando los resultados de los modelos de atenuación empleados en la simulación de manera equitativa.

6.5.2 Daños tras el terremoto de Lorca

Los primeros días tras el sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011 se realizó una inspección por parte de técnicos, arquitectos e ingenieros del Ayuntamiento de Lorca y otros voluntarios, para evaluar el grado de afección de las edificaciones y sus condiciones de habitabilidad.

El objetivo más importante de esta evaluación de seguridad inmediata era clasificar cada edificio de acuerdo a su posible uso en función de un nivel de seguridad estimado.

La ficha técnica elaborada para la inspección de los edificios por parte de estos arquitectos e ingenieros (Figura 6.25) clasificaba la afección, nivel de seguridad y uso de las edificaciones en base a un triaje de color mostrado a continuación:

- Color VERDE: Edificio o vivienda habitable.
- Color AMARILLO: Uso restringido. La edificación no tiene defectos estructurales significativos, el acceso debe hacerse con mucha precaución por el riesgo de caídas o desprendimientos.
- Color ROJO: Prohibición de entrada por daños estructurales, sin que necesariamente implique la demolición.
- Color NEGRO: Riesgo de colapso. Edificación demolida o con decreto de ruina inminente emitido.

Esta inspección fue realizada en una primera visita, a fecha de 21 mayo de 2012, para 7839 edificios del núcleo urbano de Lorca, mostrando un 4% de los edificios con daños graves y un 6% de los edificios con daños estructurales moderados, a la vez que un elevado número edificios con daños no estructurales graves que podían representar también un peligro para las personas. Estas evaluaciones siguieron modificándose e informatizándose hasta después de un año del terremoto.

Cabe resaltar que como el propio ayuntamiento indica en su servicio web de visor de daños, inicialmente se recopilaron todas las fichas de inspección realizadas, posteriormente y dado el gran volumen de datos se optó por mecanizar solamente las fichas de inspecciones que tenían afección, obviándose las verdes, salvo cambios derivados de mejoras realizadas o revisiones más exhaustivas que así lo indicasen. Esto supone una pérdida de información para la posterior evaluación de porcentajes, ya que en el cómputo total debe entrar lo dañado más lo carente de daño.

última fecha

Protocolo Técnico de Actuaciones Inmediatas. Seísmo Lorca 11-05-2011

Fecha inspección: Grupo de inspección nº:

Identificación de la edificación:

Inspeccionar preferentemente PB y PL. Igualmente cuartos de elevación de ascensores

Señalización de la edificación tras la inspección Marcar con aspa lo que proceda

☐ Verde	<p><u>Daños estructurales nulos o irrelevantes</u> Cuando no se den daños estructurales tipo 1, 2 ó 3, ni daños de riesgo en albañilería gruesa: accesos y cajas de escalera accesibles, fachadas sin riesgo inminente, etc.</p> <p><u>Intervenciones:</u> sólo tareas de adecuación de elementos con riesgo de caída: escayolas, molduras, revestimientos, etc.</p> <p><u>Acceso:</u> se permite el acceso general con la prudencia personal de los usuarios en cuanto a caída de escayolas, revestimientos, etc. Recomendable evaluación pormenorizada posterior mediante informe técnico.</p>	☐
☐ Amarillo	<p><u>Daños estructurales moderados</u> Cuando se den daños estructurales tipo 1, 2 ó 3 en elementos parciales y/o superficies delimitables.</p> <p><u>Intervenciones:</u> apuntalamientos parciales y desmontaje de elementos de albañilería con riesgo: petos, cornisas, etc. Acordonamiento de accesos y zonas de riesgo especial.</p> <p><u>Acceso:</u> sólo accesos puntuales y en periodos cortos de usuarios para retirada de enseres, pertenencias básicas, etc., hasta evaluación pormenorizada para intervención final mediante informe técnico.</p>	☐
☒ Rojo	<p><u>Daños estructurales graves</u> Cuando se den daños estructurales tipo 1, 2 ó 3 de forma generalizada o en zonas parciales con riesgo de colapso inminente</p> <p><u>Intervenciones:</u> apuntalamiento y acordonamiento general de la edificación con distancia de seguridad. Sólo en casos extremos de riesgo inminente: demolición de partes de edificación, elementos con riesgo, cajas de escalera, fachadas, etc., previo <u>informe técnico municipal y autorización administrativa</u>.</p> <p><u>Acceso:</u> desalojo general hasta evaluación pormenorizada para reparación y/o demolición general o parcial. Todo previo <u>informe técnico municipal y autorización administrativa</u>.</p>	☐

Observaciones

Firma

Figura 6.25. Ficha técnica utilizada por los arquitectos e ingenieros para la evaluación de los edificios y triaje de color realizado tras el terremoto de Lorca de 2011.

La Tabla 6-12 muestra la distribución de daños en edificios y viviendas publicadas por la Delegación de Gobierno de la Región de Murcia a fecha del mes de mayo de 2012. En este caso se muestra que un 3% de los 7876 inmuebles evaluados, correspondientes a un 15% de las viviendas del núcleo urbano de Lorca, habían sido clasificados como edificios en ruina, mientras que un 8% de edificaciones y 25% de viviendas se clasificó con color rojo, correspondiente a daños estructurales severos.

Por otra parte, la Tabla 6-13 muestra la distribución de daños según el visor de daños del Ayuntamiento de Lorca a fecha actual, la cual contiene la evaluación de 6213 fichas, mostrando un 5% de edificios con color negro, un 12% con color rojo, un 21% con daño amarillo y un 62% con color verde.

Tabla 6-12. Distribución de daños en inmuebles y viviendas publicados por la Delegación de Gobierno de la Región de Murcia. (Mayo 2012)

Distribución de daños inmuebles/viviendas		
TRIAJE	EDIFICIOS	VIVIENDAS
Negro	260	1164
Rojo	664	1973
Amarillo	1569	4594
Verde	5383	16124

Tabla 6-13. Distribución de daños en edificios publicados por el Ayuntamiento de Murcia en su servicio de información pública en la fecha actual.

Distribución de daños en edificios	
TRIAJE	EDIFICIOS
Negro	329
Rojo	723
Amarillo	1283
Verde	3878

6.5.3 Análisis de muestra obtenida en campo

Para evaluar de manera más exacta el comportamiento de las edificaciones del parque inmobiliario de la ciudad de Lorca, se realizó una visita de campo con el fin de asignar “in situ” las tipologías constructivas de una muestra de edificios. Los barrios elegidos para la evaluación se seleccionaron en base a los daños ocurridos tras el terremoto. Estos barrios son: La Viña, San José, Santiago, Parroquias Altas y San Cristóbal. La Figura 6.26 muestra un mapa con la ubicación de los edificios evaluados en estos barrios.

Durante la visita se evaluaron 746 edificios, a los cuales se les asignó *in situ* un código basado en una clasificación establecida previamente para determinar el tipo de estructura principal del edificio, forjados, cerramientos, geometría en planta y alzado, irregularidades del edificio como pilares cortos o pisos blandos y la posición del edificio en la manzana. En base a estos códigos se asignó finalmente a cada edificio una tipología constructiva compatible con las existentes en la bibliografía para la selección pertinente de espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

La ficha técnica utilizada para la evaluación de los edificios en campo se muestra en la Figura 6.27. Aunque muchos de los parámetros observados in situ no son después incluidos en la metodología de cálculo de daños, como la posición del edificio dentro de la manzana, es decir, si el edificio se encuentra en una esquina o en medio de dos edificios, el efecto golpeteo, las columnas cautivas, etc., estas características se evaluaron por si se observaba una tendencia en los edificios dañados que permitiera extraer otro tipo de conclusiones y o efectuar análisis cualitativos de cara a la interpretación de los daños ocurridos durante el terremoto. Durante la visita se observó la existencia de muchos edificios de hormigón armado con pilares cortos, ya sea por la inclinación del terreno o por contener semisótanos ventilados que suelen construirse causando este efecto. Muchos de estos edificios presentaron daños y grietas diagonales causadas por fallos por cortante durante el sismo. También se observó que la mayor parte de los edificios de hormigón armado cuentan con cerramientos o paredes de mampostería sin reforzar que durante el sismo fueron fuertemente expulsadas. Esta última práctica constructiva sí está representada en la curvas de capacidad seleccionada para la tipología constructiva RC31 identificada en este trabajo.

Una vez asignada la tipología constructiva correspondiente a cada uno de los 746 edificios evaluados, se procedió a realizar una simulación del sismo de Mw 5.2 para estimar el número de edificios con cada grado de daño con esta muestra y con muestras teóricas. Estas atendían a la distribución de vulnerabilidad de edificaciones de la Región de Murcia según la metodología de asignación de vulnerabilidad adoptada para el escenario de daños asociado al periodo de retorno de 475 años. La

muestra evaluada en campo se ha asumido como una muestra real de tipologías constructivas, a diferencia de las otras que son muestras simuladas. Compararemos entonces los resultados de daños con la muestra real, con los correspondientes a los derivados con las técnicas expuestas para la asignación de vulnerabilidad. Podremos así efectuar un análisis de sensibilidad de esta parte del problema.

Figura 6.26. Mapa con la ubicación de los edificios evaluados en la visita a campo, en los barrios de La Viña, San José, Santiago, Parroquias Altas y San Cristóbal.

DATOS

Id: 125 Referencia Catastral: XP22345970683034 Año de Construcción: 2002

Nº Viviendas: 5 Nº de plantas: B+IV+A (6) Uso actual: Residencial

Dirección postal: C/ Azucen anº 15, 28030 Lorca Estado de conservación: M. Medio (fisuras)

Índice Vulnerabilidad: 0,78 Clase Vulnerabilidad: A Tipo de suelo: III

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LA EDIFICACIÓN

MAMPOSTERÍA: ADOBE TAPIAL

MURO DE CARGA: CASCOTE Y PIEDRAS PIEDRA SIN TALLAR SILLAR FABRICA LADRILLO MIX

FORJADO: MADERA ARTESANO HORMIGÓN ARMADO OTRO

REFUERZO: CONTRAFUERTE TIRANTES OTRO

HORMIGÓN ARMADO (sin diseño sismorresistente) FORJADO UNIDIRECCIONAL FORJADO BIDIRECCIONAL

HORMIGÓN ARMADO (con diseño sismorresistente) FORJADO UNIDIRECCIONAL FORJADO BIDIRECCIONAL MUROS DE CORTE OTRO

TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA RISK-UE RC1 **TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA EMS-98** HORMIGÓN ARMADO sin diseño sismorresistente

CARACTERÍSTICAS URBANÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN

TIPOLOGÍA EDIFICATORIA
RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR
ENTRE MEDIANERAS
1a 1b 2
BLOQUE ABIERTO
3a 3b 6

MANZANA CERRADA CON PATIO DEN
EN MANZANA CERRADA Densa

ABIERTA

RESIDENCIAL UNIFAMILIAR
1a 1b 4 5
AISLADA ADOSADA O PAREADA
ENTRE MEDIANERAS AGRUPADA

LONGITUD DE FACHADA: 15m

FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA REGULAR IRREGULAR: GRUPO I: GRUPO II:

FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO REGULAR IRREGULAR: ESCALONAMIENTO BASE Y TORRE INVERTIDO VOLADIZOS OTRO

EFFECTO GOLPETEO GOLPETEO DERECHA GOLPETEO IZQUIERDA

POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA ESQUINA INTERMEDIO TERMINAL

PISO BLANDO SIN NADA DE CERRAMIENTO PARCIALMENTE CERRADO PLANTA Nº
USO DIFERENTE AL RESTO DEL EDIFICIO / DISTRIBUCION DIFERENTE AL RESTO DEL EDIFICIO / ALTURA DIFERENTE /

COLUMNA CORTA TERRENOS INCLINADOS EDIFICIOS DESNIVELÉS

COLUMNA CAUTIVA EN TODA LA EDIFICACIÓN PLANTA Nº

POSICIÓN RESPECTO A LAS ALINEACIONES EN LÍNEA FUERA DE LÍNEA RETRANQUEADA: 5m

DIFERENCIA DE ALTURA CON LOS COLINDANTES Nº DE PLANTAS EDIFICIOS ADYACENTES: +2D/-3I

Figura 6.27. Ficha utilizada para la evaluación de edificaciones y sus tipologías constructivas en la visita a campo realizada a la ciudad de Lorca.

La Tabla 6-14 incluye los resultados obtenidos para la simulación de daños con la muestra evaluada en campo, considerada como real, según los modelos de atenuación de ASK13, CB13 y CY13, y con los métodos I-DCM y MADRS.

Como se puede observar en la tabla, el método MADRS presenta mayor número de edificios con daño extenso y completo que el I-DCM, para todos los modelos de atenuación, y el modelo de atenuación de CY13 presenta los mayores valores de daño, puesto que los espectros de demanda obtenidos con este modelo presentan valores de aceleración más elevados que los modelos de ASK13 y CB13.

Comparando estos resultados con el triaje de color realizado en Lorca para estos edificios (Tabla 6-15), según planos georreferenciados otorgados por el Ayuntamiento de Lorca a fecha de 15 de julio de 2011, el modelo que más se ajusta a los daños reales observados es el modelo de CB13. Este modelo presenta el menor número de edificios con daño completo (14) de los tres modelos, coincidiendo prácticamente con el valor de edificios catalogados con color negro (13), es decir, edificios con daño estructural grave y riesgo de colapso, en el triaje de evaluación técnica de edificios tras el terremoto.

Es importante señalar que, como se mencionó anteriormente, el triaje de color realizado tras el terremoto de Lorca fue sufriendo diversas modificaciones a través del tiempo, siendo así que un año más tarde del terremoto el número de edificios con daños estructurales graves y demolidos, catalogados con color rojo y negro, se elevó considerablemente, por lo que la comparación con el triaje a fecha de julio de 2011 no representa totalmente los daños ocurridos tras el terremoto.

De igual manera, se ha observado que muchos edificios catalogados con color amarillo pasaron posteriormente a ser catalogados con colores verde o rojo, puesto que este color no representaba un grado de daño específico, sino una restricción en la habitabilidad del edificios. En algunos casos, este color representa la duda y subjetividad en la asignación de color de afección del edificio durante el triaje.

Para comparar los resultados de daño que se obtienen utilizando la muestra real, basada en la asignación de vulnerabilidad sobre los edificios evaluados en campo, con los resultados de la asignación de vulnerabilidad mediante una matriz de transferencia, se ha realizado una simulación del sismo Mw 5.2 utilizando la muestra de campo, y 20 muestras simuladas con el método de Montecarlo descrito. La Figura 6.28 muestra los resultados obtenidos para la muestra real (arriba) y para la media de los resultados obtenidos con las simulaciones (abajo).

Tabla 6-14. Resultados de número de edificios con cada grado de daño obtenidos de la simulación del terremoto de Lorca con los modelos de atenuación de Abrahamson et al. (2013), Campbell y Bozorgnia (2013), Chiou y Youngs (2013), y los métodos de capacidad-demanda I-DCM y MADRS.

MÉTODO	MODELO	SIN DAÑOS	LEVE	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO
I-DCM	ASK13	303	189	159	69	26
	CB13	237	226	193	75	14
	CY13	156	155	212	135	88
MADRS	ASK13	290	185	163	75	34
	CB13	216	187	200	104	39
	CY13	156	145	197	131	117

Tabla 6-15. Distribución de daños según triaje de color realizado tras el terremoto de Lorca, a fecha de 15 de julio de 2011, en los edificios evaluados en campo.

TRIAJE				
Blanco	Verde	Amarillo	Rojo	Negro
454	111	113	55	13

Como se puede observar en la Figura 6.28, los resultados obtenidos con la muestra de campo y las muestras simuladas son muy similares, obteniendo en la mayoría de los casos una diferencia menor a 10 edificios para los diferentes grados de daño. El modelo de atenuación que presenta menor diferencia en los resultados es el de CB13, mostrando para el daño moderado, extenso y completo, una diferencia entre 2 y 4 edificios en cada uno de estos grados de daño.

Nuevamente, el modelo de CB13 es el que presenta menor diferencia con los daños observados en estos edificios según las inspecciones realizadas por el Ayuntamiento de Lorca a fecha de 15 de julio de 2011. La Tabla 6-16 contiene la comparación de las cifras globales de edificios con cada grado de daños obtenidos con las simulaciones realizadas con este modelo de atenuación, tanto para la muestra de campo como con las muestras aleatorias, y su comparación con los daños de edificios según los colores del triaje de inspección tras el terremoto.

La Tabla 6-17 muestra los resultados por barrio obtenidos de la simulación realizada con la muestra de campo y su comparación con el triaje de color realizado en estos barrios a fecha de 15 de julio de 2012.

Figura 6.28. Resultados de grados de daño en edificios obtenidos de la simulación del sismo Mw5.2 mediante los modelos de atenuación de Abrahamson et al. (2013), Campbell y Bozorgnia (2013), Chiou y Youngs (2013), y el método I-DCM (arriba) con la muestra de edificios evaluada en la visita a campo (arriba) y con las muestras definidas con el método de asignación de vulnerabilidad mediante el método de Montecarlo (abajo).

Tabla 6-16. Resultados de daño en edificios por cada grado de daño para la simulación realizada con el modelo de atenuación de Campbell y Bozorgnia (2013) y la muestra de edificios evaluada en campo, y para las simulaciones realizadas con el mismo modelo para las muestras definidas con el método de Montecarlo de asignación de vulnerabilidad, y su comparación con el triaje de evaluación de edificios realizado en Lorca tras el terremoto de 2011.

SIMULACIÓN SISMO DE LORCA			TERREMOTO DE LORCA 2011	
GRADOS DE DAÑO	CAMPO	ALEATORIAS	TRIAJE	EDIFICIOS
Completo	14	18	Ruina	13
Extenso	75	77	Rojo	55
Moderado	193	191	Amarillo	113
Leve	226	215	Verde	111
Sin daños	238	245	Blanco	454

Tabla 6-17. Resultados de número de edificios con cada grado de daño para la simulación realizada con la muestra evaluada en campo y su comparación con el triaje de colores realizados en esos edificios tras el terremoto de Lorca, a fecha de 15 de julio de 2012.

SIMULACIÓN					
Barrios	Sin daños	Leve	Moderado	Extenso	Completo
San Cristóbal	37	38	36	14	3
La Viña	68	54	43	16	2
San José	36	33	25	9	1
Santiago	81	77	68	28	5
Parroquias Altas	16	24	21	8	3
TOTALES	238	226	193	75	14

TRIAJE				
Blanco	Verde	Amarillo	Rojo	Negro
71	32	15	10	0
112	14	38	17	2
71	12	17	3	1
145	52	32	22	8
55	1	11	3	2
454	111	113	55	13

6.5.4 Comparación de grados de daño de la metodología de riesgo utilizada y el triaje de color realizado en Lorca tras el terremoto.

Como último paso en el análisis de resultados tras la simulación del terremoto de Lorca, se han comparado los resultados del árbol lógico formulado con dos nodos para contemplar las incertidumbres inherentes a los modelos de atenuación y métodos de capacidad-demanda empleados para calcular el movimiento asociado al periodo de retorno de 475 años (

Tabla 6-18) con los daños observados tras el terremoto según el visor de daños del Ayuntamiento de Lorca (Tabla 6-19). No obstante, esta comparación sólo se puede realizar cualitativamente, puesto que los grados de daños según la metodología empleada y los niveles de color establecidos en el triaje de inspección de edificaciones en Lorca no se corresponden directamente.

Tabla 6-18. Resultados de número de edificios con distintos grados d daño, obtenidos de la simulación del sismo Mw5.2 para el escenario PR475.

SIMULACIÓN				
Sin daños	Leve	Moderado	Extenso	Completo
2209	1426	1270	695	599

Tabla 6-19. Distribución de daños observados tras el terremoto de Lorca según el visor de daño del Ayuntamiento de Lorca a fecha actual.

TRIAJE			
Verde	Amarillo	Rojo	Negro
3864	1283	723	329

A priori se podría esperar que los edificios catalogados con color verde presentaran daños no estructurales ligeros, correspondientes al grado de daño leve según la metodología seguida; que los edificios amarillos presentaran un daño moderado asociado a daños no estructurales que podrían poner en riesgo la seguridad de las personas, por lo cual se restringe su habitabilidad; que los edificios rojos presentaran daños no estructurales muy graves y daños estructurales moderados correspondientes al grado de daño extenso, y finalmente, que los edificios negros se correspondieran con edificios con daños estructurales muy severos, cercanos al colapso, lo cual equivale al grado de daño completo en la estimación del riesgo en edificaciones. Sin embargo, esta correspondencia no se puede asumir de manera cabal debido al gran número de modificaciones en la asignación de color de

los edificios que se ha observado en los diferentes planos de inspección informatizados por el Ayuntamiento de Lorca durante el primer año transcurrido desde la fecha del sismo, debidas a diferentes factores y conflictos de intereses. El primer factor corresponde a la subjetividad de la evaluación durante el triaje. Los criterios de asignación de colores no definían exclusivamente los daños observados, sino el nivel de seguridad e cuanto a habitabilidad de los edificios y viviendas. Muchos edificios fueron catalogados con color amarillo para no poner en riesgo a los ocupantes, aún cuando los daños observados no se trataran de daños estructurales, sino de grietas y desprendimientos de elementos no estructurales. De igual manera, muchos de estos edificios catalogados con color amarillo fueron posteriormente catalogados con color rojo, debido a daños estructurales más serios no apreciables en una visita de inspección rápida. En muchos casos se hace necesaria una evaluación exhaustiva y la realización de pruebas o ensayos de materiales para comprobar los cambios y daños sufridos por el edificio. Otro factor importante en la asignación de grado de afección de los edificios según el triaje de color es el tema de las aseguradoras, para las que en muchos casos era más conveniente que un edificio se declarase en ruina técnica, que los costes que conllevaría la reparación de los daños ocurridos.

En todo caso, si representamos gráficamente los porcentajes de distribución de grados de daño en los edificios obtenida de la simulación, en función de los colores de grado de afección determinados en el triaje de Lorca, se puede observar la correspondencia mostrada en la Figura 6.29.

Figura 6.29. Comparación del porcentaje de edificios con cada grado de daños resultante del estudio de riesgo con el triaje realizado en Lorca tras el terremoto del 2011. Los colores del gráfico representan los diferentes grados de daño (en celeste % edificios sin daños, en verde claro % edificios con daño leve, en crema % edificios con daño moderado, en naranja % edificios con daño extenso y en gris % edificios con daño completo). Las columnas representan el 100% de los edificios catalogados en color verde, amarillo, rojo y en ruina según el triaje.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 6.29, los edificios que resultan con daño completo según el estudio, se corresponden con el 100% de los edificios catalogados con color negro tras el triaje y aproximadamente un 60% de los edificios catalogados con color rojo. Los edificios con daño extenso representan el 40% restante de los edificios con color rojo y un 50% de los edificios catalogados con color amarillo. Los edificios que resultan con grado de daño moderado según el estudio se corresponden con un 50% de los edificios catalogados con color amarillo más un 20% de los edificios con asignación de color verde. Finalmente, el número de edificios restante de la simulación correspondiente a los grados de daño leve y nulo, se corresponden con los edificios catalogados en color verde según los daños cuantificados por el Ayuntamiento de Lorca.

Esta comparación de daños se muestra de manera inversa en el gráfico mostrado en la Figura 6.30. En este caso, la correspondencia del número de edificios con cada color de grado de afección asignado en el triaje se muestra con respecto a los grados de daños definidos según la metodología aplicada para el estudio.

Figura 6.30. Correspondencia de número de edificios con cada grado de daño obtenidos del estudio de riesgo con respecto al triaje realizado en Lorca tras el terremoto del 2011. El color verde representa los edificios catalogados con este color según el triaje, correspondientes a edificios habitables, el color amarillo representa los edificios catalogados con uso restringido, el color rojo representa los edificios catalogados con este color por daño estructurales severos que prohibían su uso, y el color negro representa los edificios colapsados, con riesgo inminente de colapso y declarados en ruina técnica.

CAPÍTULO 7

SIMULACIÓN DEL ESCENARIO DE DAÑO ASOCIADO AL SISMO OBTENIDO PARA PR975

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone la caracterización del escenario relacionado al sismo obtenido de la desagregación para el periodo de retorno de 975 años, referido al movimiento esperado con un 5% de excedencia en los próximos 50 años y estipulado generalmente para estructuras de importancia especial, como son hospitales, instituciones, colegios, ente otros.

Este sismo de control corresponde a un terremoto con magnitud de Mw 6.5, ubicado entre 10 y 20 km de distancia con respecto al centro de la ciudad de Lorca. Para la simulación se emplearán los modelos que se han identificado como los mas idóneos, por reproducir mejor el escenario real del terremoto de Lorca, 2011.

Al igual que en el caso del escenario asociado al periodo de retorno de 475 años, los resultados de este escenario se mostrarán en una serie de mapas representativos de los distintos parámetros indicadores del riesgo sísmico en el núcleo urbano de Lorca.

Se exponen, en primer lugar, las características del sismo simulado según los parámetros geométricos de la falla a la que ha sido asociado y el plano de ruptura modelado para la simulación.

Los modelos de atenuación utilizados serán los anteriormente seleccionados en base a los análisis mostrados en capítulos anteriores. Los espectros específicos obtenidos con estos modelos se muestran en un siguiente apartado.

Una vez definido el movimiento fuerte de entrada a las edificaciones que conforman el parque inmobiliario de Lorca, se estiman los parámetros de riesgo sísmico referidos a los diferentes grados de daño esperado en las estructuras, el número de viviendas que resultarían inhabitables y personas que quedarían sin hogar y finalmente, las pérdidas humanas y económicas que se podrían esperar para este escenario concerniente a un sismo extremo posible en la ciudad de Lorca.

7.2 CARACTERÍSTICAS DEL TERREMOTO

7.2.1 Modelización del plano de ruptura

El sismo obtenido como más probable para un periodo de retorno de 975 años corresponde a una magnitud de Mw 6.5 a una distancia entre 10 y 20 km de la ciudad de Lorca. Aunque este sismo pueda parecer excesivamente elevado si se observa la sismicidad catalogada en la región, estudios de paleosismicidad confirman que el sistema de fallas de Alhama de Murcia ha llegado a generar sismos de esta magnitud y aún mayores hace miles de años. Existe Incluso la posibilidad de que dos segmentos de esta falla, los tramos de Goñar-Lorca y Lorca-Totana, podrían romper de manera conjunta, pudiendo generar un sismo con Mw 7.0 o mayor (Martínez-Díaz et al. 2012; Ortuño et al., 2012). Estos estudios señalan la necesidad de que estas probabilidades sean tomadas en cuenta en los estudios de peligrosidad sísmica de esta región.

Según los datos publicados en la base de datos de fallas activas del Cuaternario en Iberia (QAFIv.3), el segmento de la falla de Alhama de Murcia con mayor potencial sísmico debido a sus características geométricas y magnitud máxima asociada es el segmento de Goñar-Lorca. Esta falla presenta una magnitud máxima de Mw 6.9 y fecha de ocurrencia del último terremoto de este tamaño hace 3250 años. (García-Mayordomo (2005); Ortuño et al., 2012; Martínez-Díaz et al. 2012).

La Tabla 7-1 muestra los parámetros de la falla y del plano de ruptura considerado, para el escenario sísmico asociado al sismo de Mw 6.5. La Tabla 7-2 muestra las coordenadas finales del plano generado y en la Figura 5.2 se muestra una vista en planta de la localización del plano con respecto a la ubicación de la ciudad de Lorca.

Tabla 7-1. Características del plano de ruptura modelado para la simulación del sismo asociado al escenario de PR975.

Magnitud (Mw)	6.5
Mecanismo	Direccional Inversa
Acimut Θ	215º
Buzamiento β	70º
Deslizamiento	20º
Longitud (m)	20201.76
Anchura (m)	10106.73
Profundidad del techo de ruptura (m)	2000
Coordenada X del punto medio de la traza	605993.81
Coordenada Y del punto medio de la traza	4158796.15

Tabla 7-2. Coordenadas y profundidad del plano de ruptura generado para el sismo de Mw6.5.

ID	Coord. X (UTM)	Coord. Y (UTM)	Z
1N	611787	4167070	-2000
1S	600200	4150522	-2000
2S	597369	4152505	-11497
2N	608956	4169053	-11497

Figura 7.1. Vista en planta de la localización del plano de ruptura del sismo Mw 6.5 generado con respecto a la ciudad de Lorca (en verde).

7.2.2 Movimiento fuerte y espectros específicos

Para la simulación del sismo se aplicaron los mismos modelos de atenuación seleccionados para el escenario de periodo de retorno de PR475, por ser los que presentaron un mejor ajuste con datos locales según el análisis de residuos realizado, además de ser los modelos más completos para considerar las características de ruptura de la fuente y la velocidad de onda V_{s30} del suelo. Estos modelos son los de Abrahamson y Silva (ASK13), Campbell y Bozorgnia (CB13) y Chiou y Youngs (CY13). En este caso no se ha incorporado el modelo propio de Ruiz et. al (2012) puesto que sólo es aplicable para magnitudes menores a Mw 5.5.

Mediante los modelos indicados se calcularon las aceleraciones esperadas incluyendo el efecto local en términos de PGA y aceleraciones espectrales SA (T) correspondientes a los periodos de T=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1, 1.5 y 2 segundos en todos los edificios de la ciudad de Lorca. La Tabla 7-3 muestra los diferentes rangos de aceleración obtenidos en la ciudad para PGA, Sa(0.1s) y Sa(1s). Tal como se puede apreciar en la tabla, las mayores aceleraciones esperadas se obtienen con el modelo de CY13, aunque este modelo presenta mayor variación de valores que los modelos de ASK13 y CB13. La media de las aceleraciones obtenidas con los tres modelos se encuentra entorno al valor de 0.4g para PGA, 0.69g para Sa(0.1s) y 0.5g para Sa(1s). Los valores obtenidos para Sa(1s) muestran una fuerte influencia del movimiento en los largos periodos.

La Figura 7.2, Figura 7.3, Figura 7.4 y Figura 7.5 muestran los espectros de respuesta obtenidos en los diferentes barrios de la ciudad de Lorca para los tipos de suelo B, C, D y E, según la clasificación del NEHRP, respectivamente, y su comparación con el espectro de la NSCE-01 para PR975 (factor de importancia 1.3). En la mayoría de los casos, las mayores aceleraciones según los espectros de respuesta se esperan al sur de la ciudad, en los barrios de La Viña y San José, ambos con clase de suelo B y C, y en el barrio de San Antonio, con suelo mayoritariamente de clase D. Llama la atención la diferencia en la forma de los espectros esperados en el barrio de San Fernando, localizado al sureste de la ciudad de Lorca, para los cuales el pico de aceleraciones se observa en el periodo de 0.2 segundos y decrece rápidamente para el resto de periodos. Sin embargo que para los demás barrios, se observa que las aceleraciones máximas de los espectros se mantienen hasta el periodo de 0.4s y presentan valores mucho más elevados para los largos periodos. Es decir, la meseta de los espectros es más alta y más ancha. También se observa una diferencia en la forma espectral en el barrio de San Diego, localizado al noreste de la ciudad y con tipo de suelo C, donde se presentan valores más elevados que en el resto de barrios para los largos periodos.

Tabla 7-3. Valores de aceleración PGA obtenidos de la simulación del sismo Mw 5.2, para los tres modelos de atenuación empleados, siendo Y la aceleración media del modelo, Y+σ la aceleración más la sigma del modelo y Y-σ la aceleración menos la sigma del modelo.

T	ASK13			CB13			CY13		
	Y	Y+σ	Y-σ	Y	Y+σ	Y-σ	Y	Y+σ	Y-σ
PGA	0.23- 0.40	0.42- 0.73	0.12- 0.23	0.31- 0.52	0.44- 0.78	0.23- 0.35	0.29- 0.59	0.49- 0.99	0.17- 0.35
Sa0.1s	0.40- 0.78	0.62- 1.45	0.25- 0.43	0.31- 1.01	0.45- 1.73	0.22- 0.60	0.49- 1.17	0.95- 2.25	0.26- 0.61
Sa1.0s	0.12- 0.66	0.25- 1.10	0.06- 0.39	0.18- 0.90	0.29- 1.40	0.11- 0.58	0.15- 0.98	0.27- 1.77	0.08- 0.54

Figura 7.2. Barrios con los mayores espectros de respuesta obtenidos en la clase de suelo B de ciudad de Lorca, según el modelo de a) ASK13, b) CB13, c) CY13 y d) MP12, para el sismo Mw 6.5.

Figura 7.3. Barrios con los mayores espectros de respuesta obtenidos en suelo C de ciudad de Lorca, según el modelo de a) ASK13, b) CB13, c) CY13 y d) MP12, para el sismo Mw 6.5.

Figura 7.4. Barrios con los mayores espectros de respuesta obtenidos en la clase de suelo D de ciudad de Lorca, según el modelo de a) ASK13, b) CB13, c) CY13 y d) MP12, para el sismo Mw 6.5.

Figura 7.5. Espectro de respuesta máxima obtenido en la clase de suelo E de ciudad de Lorca para el sismo Mw 6.5, según el modelo de a) ASK13, b) CB13, c) CY13 y d) MP12.

Tal como muestran los gráficos en la Figura 7.2, Figura 7.3 y Figura 7.4, los espectros resultantes en tipos de suelo B, C y D son en todos los casos mucho más elevados que el espectro actual de la norma NCSE-02 para un periodo de retorno de 975 años en esta región. En el caso del barrio con tipo de suelo E (Figura 7.5), el espectro resultante es menor que el espectro actual de la norma en periodos mayores a 0.5s, sin embargo, en los cortos periodos también presenta valores más elevados que el espectro de la norma.

7.3 ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

Empleando los espectros de demanda obtenidos del cálculo determinista, se estimó el daño que sufrirían las edificaciones del parque inmobiliario de Lorca, cuya exposición y vulnerabilidad se indicó en el apartado 5.3 de este trabajo. Se determinaron además las pérdidas asociadas a estos daños para la acción sísmica definida. Para cuantificar la incertidumbre de resultados inherente a la elección de modelos de atenuación y de los métodos analíticos de cálculo, se elaboró el árbol lógico mostrado en la Figura 7.6. El cálculo se ha realizado con las aceleraciones medias de los espectros obtenidos con los tres modelos de atenuación utilizados.

Figura 7.6. Árbol lógico establecido para la estimación de grados de daño en los edificios de la ciudad de Lorca para el escenario asociado al sismo Mw 6.5 y PR975.

Los espectros de capacidad y curvas de fragilidad utilizados para este caso son los mismos seleccionados para el escenario de PR475 y mostrados en el apartado 5.4.1., definidos por los parámetros dados por Lagomarsino y Giovanizzi (L&G06) para las edificaciones con tipología constructiva de mampostería y por la metodología Hazus para el caso de edificios de hormigón armado. La clasificación de grados de daños es la misma que se ha utilizado a lo largo de todo este trabajo, basada en los grados de daños definidos por las metodologías Hazus y Risk-UE, y coincidente con los

grados de daños utilizados en el desarrollo de las curvas de fragilidad dadas por L&G06.

Los resultados del riesgo sísmico referente al daño en edificaciones y viviendas, la estimación de víctimas y los costes de reconstrucción y reparación de viviendas, relacionados a este escenario, se muestran en los siguientes subapartados.

7.3.1 Daño en edificaciones y viviendas

Las probabilidades de daño obtenidas para este escenario en cada barrio de la ciudad, según la clasificación de grados de daño: nulo, leve, moderado, extenso y completo, se muestran en la Tabla 7-4. En esta tabla se indica también el índice de daño medio obtenido para cada barrio.

En base a las probabilidades de daño obtenidas en cada edificio, se estimó el número total de edificios y viviendas que resultarían con cada grado de daño, en los diferentes barrios de la ciudad. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7-5.

La mayor parte de los barrios presentan un índice de daño medio con valores entre 2 y 3. Los mayores índices de daño medio se observan en los barrios de Parroquias Altas, San Fernando y Santiago, presentando un valor mayor a 3, lo que se corresponde con un daño extenso en la mayoría de edificaciones de estas zonas. No obstante, los barrios que presentan un mayor número de edificios con daño completo son los de San Cristóbal, San Mateo y San José, debido a la mayor densidad de edificaciones y viviendas en estas áreas.

En cifras globales, para un sismo de esta magnitud en Lorca, de los 6199 edificios de vivienda analizados, se observa que 2667 edificaciones podrían sufrir un daño completo, las cuales se corresponden con un número de 7806 viviendas. Por su parte, 1308 edificios y 5246 viviendas resultarían con daño extenso, 1269 edificios y 6378 viviendas alcanzarían un daño moderado, 587 edificios y 3088 viviendas sufrirían daños leves.

La distribución de daños en edificios en los diferentes barrios de la ciudad de Lorca se muestra en el mapa representado en la Figura 5.24 y la distribución del número de viviendas afectadas y del índice de daño medio en cada barrio se indica en el mapa mostrado en la Figura 5.25.

Tabla 7-4. Matriz de probabilidad de daño resultante de la estimación de daños en edificios a través de los métodos de capacidad-demanda para los diferentes barrios de la ciudad de Lorca. D_0 representa el daño nulo, D_1 el daño leve, D_2 el daño moderado, D_3 el daño extenso, D_4 el daño completo y D_m es el índice de daño medio.

Barrio	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_m
Apolonia	0.11	0.15	0.27	0.23	0.23	2.32
Corazón de María	0.08	0.11	0.21	0.22	0.38	2.70
La Isla	0.04	0.08	0.20	0.24	0.44	2.95
La Viña	0.08	0.11	0.24	0.24	0.32	2.62
Los Ángeles	0.14	0.18	0.30	0.21	0.18	2.10
Parroquias Altas	0.04	0.07	0.17	0.19	0.53	3.10
San Antonio	0.05	0.08	0.19	0.23	0.45	2.95
San Cristóbal	0.05	0.09	0.21	0.21	0.44	2.88
San Diego	0.06	0.09	0.21	0.24	0.40	2.84
San Fernando	0.04	0.07	0.18	0.22	0.49	3.05
San José	0.08	0.11	0.22	0.21	0.38	2.70
San Mateo	0.05	0.08	0.19	0.20	0.48	2.97
Santa Quiteria	0.05	0.08	0.20	0.23	0.45	2.95
Santiago	0.04	0.08	0.19	0.20	0.49	3.02
Virgen de las Huertas	0.05	0.09	0.21	0.24	0.40	2.86

Tabla 7-5. Número de edificios y viviendas con cada grado de daño en los barrios de la ciudad de Lorca. E y V representan el número total de edificios y viviendas contenidos en cada barrio, ED_i y VD_i representan el número de edificios y viviendas con cada grado de daño i , respectivamente.

Barrio	E	V	ED_0	ED_1	ED_2	ED_3	ED_4	VD_0	VD_1	VD_2	VD_3	VD_4
Apolonia	96	529	11	14	26	22	22	73	112	173	99	72
Corazón de María	497	772	41	53	106	108	189	82	103	184	157	245
La Isla	195	725	9	15	39	47	85	20	48	155	176	326
La Viña	145	1980	12	16	35	35	47	151	233	522	471	603
Los Ángeles	80	957	11	15	24	16	14	150	200	306	172	129
Parroquias Altas	486	550	20	34	80	94	258	29	43	96	106	275
San Antonio	198	659	10	15	38	46	88	38	60	145	163	252
San Cristóbal	1374	5181	73	130	284	289	598	427	783	1518	1079	1374
San Diego	53	56	3	5	11	13	21	3	5	12	14	22
San Fernando	134	760	5	9	25	30	65	21	52	156	165	367
San José	1185	4755	92	134	261	246	453	482	690	1248	962	1372
San Mateo	1094	4225	54	92	209	219	520	197	410	1027	936	1654
Santa Quiteria	286	655	13	23	57	65	128	45	76	167	155	213
Santiago	316	2414	12	25	61	63	155	125	255	631	549	854
Virgen de las Huertas	60	155	3	5	13	15	24	11	17	38	42	47
TOTALES	6199	24373	368	587	1269	1308	2667	1855	3088	6378	5246	7806

Figura 7.7. Mapa de distribución de daño en los edificios, según la clasificación de grados de daño de Risk-UE: nulo, ligero, moderado, extenso y completo, en los diferentes barrios de la ciudad de Lorca, para el sismo de Mw6.5

Figura 7.8. Mapa de distribución de viviendas con diferentes grados de daño (arriba) y del índice de daño medio (abajo) en los diferentes barrios de ciudad de Lorca, para el sismo de Mw6.5.

7.3.2 Viviendas inhabitables y personas sin hogar

A partir de los resultados de daño extenso y completo obtenidos y siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.7.3.1 de este trabajo, el número resultante de viviendas inhabitables y personas que resultarían sin hogar para el escenario asociado al sismo de Mw 6.5 es de 12,528 viviendas y 30,854 personas.

La distribución de estos valores en los diferentes barrios de la ciudad se muestra numéricamente en la Tabla 7-6 y a través de mapas representativos en la Figura 7.9.

Como se observa en el mapa, los barrios que presentan el mayor número de viviendas inhabitables son los barrios de San Mateo, San Cristóbal y San José, seguidos por los barrios de Santiago y de La Viña. En cuanto a las personas que resultarían sin hogar, también son los tres primeros barrios mencionados los que presentan las mayores cifras. Sin embargo, por encima de los barrios de La Viña y Santiago, se encuentran otros barrios como San Fernando y La Isla, que cuentan con una mayor densidad de habitantes en los edificios que resultarían con daños graves.

Tabla 7-6. Número de viviendas inhabitables y personas que quedarían sin hogar para el escenario del sismo Mw 6.5, en ciudad de Lorca.

Barrio	Viviendas inhabitables	Personas sin hogar
Apolonia	161	526
Corazón de María	387	204
La Isla	485	3086
La Viña	1027	2409
Los Ángeles	284	913
Parroquias Altas	371	919
San Antonio	399	388
San Cristóbal	2345	5990
San Diego	35	220
San Fernando	515	3097
San José	2238	5681
San Mateo	2497	6218
Santa Quiteria	352	369
Santiago	1347	314
Virgen de las Huertas	85	519
TOTALES	12528	30854

Figura 7.9. Mapa de distribución de viviendas inhabitables (arriba) y personas que resultarían sin hogar (abajo) para el sismo de Mw5.2, en los diferentes barrios de ciudad de Lorca.

7.3.3 Pérdidas humanas

Al igual que para el escenario de PR475, las pérdidas humanas asociadas al escenario PR975, relacionado al sismo Mw 6.5, se han estimado siguiendo la metodología descrita en el *apartado 3.7.3.4*. Para esto, se ha estimado el número de edificios y viviendas que alcanzarían el colapso y con ello, el número de víctimas mortales y heridos con diferentes nivel de gravedad que resultarían a partir de este daño.

El número de víctimas final resulta del promedio de resultados obtenidos del cálculo para diferentes franjas horarias de ocurrencia del evento. Al igual que para el primer escenario, se ha estimado el número de víctimas para un sismo que ocurre en diferentes franjas horarias: por la mañana, por la tarde y de madrugada.

Aplicando la ecuación de correlación de aceleraciones e intensidad macrosísmica (ecuación 5-1), se obtiene para este sismo una intensidad de VIII, la cual nos permite seleccionar el factor empírico representativo del porcentaje medio de personas atrapadas por colapso, de acuerdo a las tablas mostradas en el apartado antes mencionado, de la metodología de Coburn y Spence (2002).

El número total de víctimas obtenido de esta estimación, para cada barrio, se muestra en la Tabla 7-7, y su distribución se encuentra representada en el mapa mostrado en la Figura 7.10.

Tabla 7-7. Número de edificios y viviendas que alcanzarían el colapso, y número de víctimas mortales y heridos de diferentes grados, asociados a este daño, para el escenario definido por el sismo Mw 6.5 en ciudad de Lorca.

Barrio	Edificios Colapsados	Viviendas colapsadas	Muertos	Heridos de urgencia	Atención médica	Con heridas leves
Apolonia	1	10	5	5	5	5
Corazón de María	12	24	2	2	2	2
La Isla	10	45	46	41	46	41
La Viña	6	89	33	30	33	30
Los Ángeles	1	17	9	8	9	8
Parroquias Altas	13	16	6		6	6
San Antonio	9	35	5	5	5	5
San Cristóbal	23	169	69	61	69	61
San Diego	2	2	2	2	2	2
San Fernando	7	51	49	44	49	44
San José	31	171	70	62	70	62
San Mateo	31	186	74	66	74	66
Santa Quiteria	8	25	4	4	4	4
Santiago	9	113	4	4	4	4
Virgen de las Huertas	2	6	6	5	6	5
TOTALES	165	961	345	384	345	384

Figura 7.10. Mapa de distribución de víctimas mortales (arriba) y heridos de diferentes grados: con carácter de urgencia, que necesitan atención médica y heridos leves, junto al número total de heridos (abajo), en los diferentes barrios de ciudad de Lorca.

7.3.4 Pérdidas económicas

La pérdidas económicas relacionadas al daño físico en las edificaciones para este escenario se han estimado a partir de los costes de reconstrucción y reparación de viviendas con diferentes grados de daño en la ciudad de Lorca, según las cifras publicadas por la Delegación de Gobierno de la Región de Murcia, tras el terremoto de Lorca del 2011 (Figura 5.27). Se ha asumido el precio de las viviendas catalogadas con color negro para las viviendas obtenidas con daño completo en el estudio, el precio de las viviendas con color rojo para las obtenidas con daño extenso, el precio de las catalogadas con color amarillo para el daño extenso y el precio de viviendas de color verde para las viviendas que sufrirían daño leve.

Los resultados de costes de reconstrucción, reparación extensa, reparación moderada y reparación de daños leves, se muestran en la Tabla 7-8, junto al número de viviendas con cada grado de daño estimado en los diferentes barrios de la ciudad de Lorca.

En cifras globales, para el sismo de magnitud Mw 6.5 definido en este escenario, los costes asociados a la reconstrucción y reparación de los daños en los edificios de viviendas alcanzaría una cifra de 768 millones de euros. De esta cifra, 331 millones de euros correspondería a la reconstrucción de edificios con daño completo, que podrían alcanzar el colapso o que requerirían ser demolidos por daños estructurales irreparables. Los 437 millones de euros restantes corresponden a la reparación de edificios con diferentes grados de daño, tanto daños ligeros como grietas o desprendimientos, hasta daños más extensos como daños estructurales en elementos constructivos, sin que estos impliquen la demolición del edificio.

Los barrios que presentan los mayores costes asociados a los daños son los de San Mateo y San Cristóbal, seguidos por los barrios de San José, Santiago y el barrio de La Viña.

La distribución de los costes de reconstrucción en los barrios de ciudad de Lorca se puede observar en el mapa mostrado en la parte superior de la Figura 7.11. y los costes de reparación, tanto por tipo de reparación como en cifras totales, para cada barrio, se muestra en la parte inferior de la figura.

Tabla 7-8. Costes de reconstrucción y reparación estimados para las viviendas con diferentes grados de daño en los barrios de la ciudad de Lorca. VD_i representa el número de viviendas con grado de daño i ($i=0$ para daño nulo, 1 para daño ligero, 2 para daño moderado, 3 para daño extenso y 4 para daño completo). Reconstrucción representa los costes de reconstrucción de las viviendas con daño completo, y Rep. Extensa, Rep. Moderada y Rep. Ligera los costes de reparación de las viviendas con daño extenso, moderado y leve, respectivamente.

BARRIOS	VD_0	VD_1	VD_2	VD_3	VD_4	RECONSTRUCCIÓN	REP. EXTENSA	REP. MODERADA	REP. LIGERA	COSTE TOTAL
Apolonia	73	112	173	99	72	3 053 648.06 €	2 912 757.40 €	2 767 826.01 €	1 945 750.46 €	10 679 981.93 €
Corazón de María	82	103	184	157	245	10 405 500.12 €	7 774 704.52 €	3 670 634.17 €	1 922 368.06 €	23 773 206.87 €
La Isla	20	48	155	176	326	13 826 602.05 €	9 940 176.00 €	3 706 288.05 €	1 269 332.37 €	28 742 398.47 €
La Viña	151	233	522	471	603	25 560 216.47 €	20 121 294.73 €	10 772 004.51 €	4 916 563.64 €	61 370 079.36 €
Los Ángeles	150	200	306	172	129	5 485 679.24 €	5 166 984.66 €	4 850 886.65 €	3 448 380.90 €	18 951 931.46 €
Parroquias Altas	29	43	96	106	275	11 680 618.76 €	7 887 912.22 €	2 258 783.30 €	909 250.37 €	22 736 564.65 €
San Antonio	38	60	145	163	252	10 694 469.58 €	8 010 885.39 €	3 445 973.33 €	1 323 605.89 €	23 474 934.18 €
San Cristóbal	427	783	1518	1079	1374	58 264 137.32 €	45 928 689.60 €	27 249 622.76 €	15 244 406.02 €	146 686 855.69 €
San Diego	3	5	12	14	22	946 344.72 €	698 994.37 €	285 318.58 €	109 097.33 €	2 039 755.00 €
San Fernando	21	52	156	165	367	15 554 876.58 €	10 781 801.41 €	3 551 298.33 €	1 304 333.03 €	31 192 309.35 €
San José	482	690	1248	962	1372	58 176 716.33 €	44 479 524.45 €	23 456 346.53 €	12 951 904.91 €	139 064 492.23 €
San Mateo	197	410	1027	936	1654	70 146 516.17 €	50 940 605.09 €	21 326 717.26 €	9 238 547.10 €	151 652 385.61 €
Santa Quiteria	45	76	167	155	213	9 013 327.95 €	6 961 846.68 €	3 503 676.36 €	1 581 796.59 €	21 060 647.59 €
Santiago	125	255	631	549	854	36 193 250.94 €	27 069 188.00 €	12 727 967.63 €	5 705 554.93 €	81 695 961.50 €
Virgen de las Huertas	11	17	38	42	47	1 989 023.32 €	1 628 568.53 €	893 845.52 €	358 413.22 €	4 869 850.59 €
Total general	1855	3088	6378	5246	7806	330 990 927.61 €	250 303 933.06 €	124 467 188.99 €	62 229 304.83 €	767 991 354.48 €

Figura 7.11. Mapa de distribución de pérdidas económicas asociadas al escenario del sismo de Mw6.5. Arriba: costes totales por barrio. Abajo: costes de reconstrucción (en millones de euros); abajo: costes de reparación totales, y según el tipo de reparación: ligera, moderada y extensa.

CAPÍTULO 8

SUMARIO Y CONCLUSIONES

El sumario y las conclusiones deducidas de esta tesis doctoral se presentan a continuación, clasificados en diferentes bloques concernientes a las distintas fases desarrolladas en el estudio.

REFERENTE A LAS MODELIZACIONES Y TÉCNICAS PROPUESTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

Uno de los objetivos principales de esta tesis ha consistido en presentar una metodología con técnicas óptimas para la evaluación integral del riesgo sísmico. En este sentido, se ha descrito cada fase y procedimiento de cálculo de los distintos parámetros y modelos que intervienen en el cálculo de la peligrosidad sísmica, exposición, asignación de vulnerabilidad, estimación del daño en las edificaciones y viviendas, pérdidas humanas y pérdidas económicas.

Para la estimación de la peligrosidad sísmica se propone la configuración de un árbol lógico con dos metodologías de modelización de la fuente sísmica: por un lado, el método clásico zonificado (MCZ), dada su contrastada y amplia aplicación en estudios de peligrosidad sísmica a nivel mundial. Por otra parte, se propone la metodología híbrida de zonas y fallas (MHZF) de Rivas-Medina (2014), la cual representa un avance en los esfuerzos por incluir las fallas como fuentes independientes en el estudio probabilista de la peligrosidad sísmica tanto a nivel regional como a escala local. Esta última metodología, hasta el momento, es recomendada sólo para zonas que contengan fallas lentas, y requiere información detallada de la geometría y tasas de deslizamiento de las fallas activas.

Para la selección de los modelos que mejor representen la atenuación del movimiento fuente-emplazamiento, se propone la aplicación de métodos de análisis de residuos que sirven para contrastar los modelos existentes en la bibliografía con datos locales, siempre que se cuente con una base de datos acelerométrica de la región. Los métodos que se proponen para este fin son los desarrollados por Scherbaum (2004), Scherbaum (2008) y Kale y Akkar (2012). En este aspecto, también se proponen los modelos de atenuación de la nueva generación (NGA-West2), como los más completos para modelizar las fuentes y predecir el movimiento fuerte con mayor precisión.

Por otro lado, entre las técnicas utilizadas para la obtención de modelos de velocidad de la onda de cizalla Vs30 en el emplazamiento de estudio, se han expuesto los dos métodos más utilizados actualmente: el método SPAC y el método MASW, los cuales presentan las ventajas de ser no invasivos, y permiten obtener un modelo de la estructura del suelo lo más exacto posible para cuantificar el efecto local.

En cuanto a la creación de la base de datos de los elementos expuestos al riesgo, en el caso de no contar con información catastral o estadística de las construcciones, y de no ser posible llevar a cabo

una campaña de campo para identificar las tipologías constructivas presentes en el sitio de estudio, se propone identificar patrones de tipologías y prácticas constructivas a través de revisión bibliográfica y de herramientas de visualización como GoogleStreetView y Openstreetmap, y estimar la distribución porcentual de las mismas y su nivel de diseño sismorresistente a partir de la edad de las edificaciones y de un estudio de la evolución temporal en la implementación de normativas sismorresistentes en la región.

Un aporte que se ha realizado en esta tesis y que completa y enriquece la metodología de cálculo del riesgo sísmico es incorporar los posibles errores debidos a la asignación de vulnerabilidad de tipologías constructivas sobre la base de datos de los edificios. Para esto se propone la implementación de un método estocástico de Montecarlo, mediante la simulación de un número mínimo de 100 muestras de asignación aleatoria (manteniendo la distribución porcentual por año de construcción), para las cuales se estimarán los distintos grados de daño, se comprobará la normalidad del conjunto de resultados (test de Kolmogorov-Smirnov), y se obtendrá el número medio de edificios con cada grado de daño y su desviación estándar.

Para estimar las probabilidades de daño que alcanzarán las edificaciones, se propone la aplicación de métodos analíticos, por considerarse los mas idóneos cuando la acción sísmica de entrada se expresa en términos de aceleraciones pico (PGA) y espectrales SA(T). Se proponen los métodos I-DCM y MADRS, publicados por FEMA 440, el primero por ser un método de fácil implementación y el segundo por ser un método iterativo de linealización equivalente que toma en cuenta de manera analítica las características de rigidez, periodo efectivo y amortiguamiento de las estructuras a través de ecuaciones aplicables para cualquier tipo de comportamiento histerético. Esto supone una ventaja en este tipo de estudios en el que se requiere analizar el comportamiento de un número muy elevado de edificaciones sin contar frecuentemente con información geométrica y estructural detallada sobre las mismas.

REFERENTE A LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL ESTUDIO DE PELIGROSIDAD PROBABILISTA PARA LA CIUDAD DE LORCA

La metodología descrita se ha aplicado al núcleo urbano de la ciudad de Lorca. La estimación de la peligrosidad sísmica se realizó con un enfoque probabilista-determinista. Para el cálculo de peligrosidad probabilista se aplicaron los métodos de caracterización de las fuentes MCZ y MHZF, con a tres modelos de atenuación: Abrahamson y Silva (2013), Campbell y Bozorgnia (2013) y el modelo propio Ruiz et. al (2012), combinado con el modelo europeo Akkar y Bommer (2010), permitiendo realizar un análisis de sensibilidad en cuanto a la elección de modelos. En el caso del método MHZF,

para caracterizar las fallas activas se utilizaron las tasas de deslizamiento publicadas por QAFIV3.0, por un lado, y por otra parte, en el caso de las fallas de Alhama de Murcia, Palomares y Carboneras se realizó otro cálculo con tasas de deslizamiento obtenidas con técnicas geodésicas. Los resultados obtenidos con cada una de estas opciones de cálculo se presentan en las figura 4.24, figura 4.25 y figura 4.26, y una comparación de los mismos se ha representado en los mapas mostrados en la figura 4.27. Los valores de aceleración obtenidos según el método MHZF utilizando las tasas de deslizamiento geodésicas son bastante más elevados que los obtenidos con las tasas de deslizamiento del QAFI, duplicando su valor en el entorno de las fallas de Alhama de Murcia y Carrascoy. Por otra parte, al comparar los valores medios de aceleración obtenidos con el método MHZF con los resultados obtenidos con el MCZ, se observa que en el entorno de las fallas las aceleraciones esperadas son mayores en el primer caso, lo cual se corresponde con lo observado en diversos terremotos como el de Lorca de 2011, en el que las aceleraciones llegan a triplicarse en el entorno de falla y se atenúan rápidamente con la distancia. El método MCZ, al distribuir de manera homogénea la peligrosidad en cada zona, presenta mayores valores que el MHZF en las zonas alejadas del entorno de las fallas.

Los resultados obtenidos con estos métodos y modelos se han combinado en un árbol lógico, con igual peso, para calcular la peligrosidad sísmica esperada en la ciudad de Lorca para los periodos de retorno de 475 años y 975 años (10% y 5% de excedencia en 50 años, respectivamente). Las aceleraciones esperadas en términos de PGA, S_a (0.1s) y S_a (1s), representadas primeramente para emplazamientos genéricos en roca, se pueden observar en los mapas mostrados en las Figuras 4.28 a Figura 4.30. En el caso de PGA, se obtuvieron valores en roca de 0.31g a 0.33g para PR475 y de 0.41 a 0.44g para PR975, para S_a (0.1s) las aceleraciones alcanzan valores de 0.67g a 0.71g para PR475 y de 0.90g a 0.94g para PR975, y para S_a (1s) se esperan aceleraciones entre 0.20g y 0.21g para PR475 y de 0.29g a 0.31g para PR975.

Para cuantificar el efecto local se realizó una clasificación de suelos a partir de las velocidades V_{s30} obtenidas en diferentes puntos de la ciudad de Lorca por Navarro et. al (2013), y se efectuó su correspondencia con las clases de suelos definidas en el NEHRP (2009). (Figura 4.21). La ciudad presenta 4 tipos de suelos, aunque la mayor parte se corresponde con el tipo de suelo C (suelo medio con V_{s30} entorno a los 490 m/s). A partir de esta información se calculó la peligrosidad sísmica en suelo para los periodos $T=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1, 1.5$ y 2s. En las Figuras 4.31 a Figura 4.33 se muestran los mapas de peligrosidad representados para PGA, $S_a(0.1s)$ y $S_a(1s)$. Las aceleraciones esperadas en suelo alcanzan valores de 0.39g para PR475 y de 0.45g para PR975 debido a la amplificación de los suelos más blandos. Los mayores valores se observan al noroeste de la ciudad, debido a su proximidad a la falla de Alhama de Murcia, y entorno a la cuenca del río Guadalentín. Los

barrios de La Viña y San José muestran grandes diferencias de aceleraciones debido a la presencia de varios tipos de suelos en éstas áreas, desde roca (suelo B), hasta suelo blando del tipo D. Los espectros de respuesta obtenidos en los diferentes barrios de la ciudad se han comparado con el espectro de la NSCE-02 para cada clase suelo, tanto para PR475 (Figura 4.34 a Figura 4.37), como para PR975 (Figuras 4.38 a Figura 4.41), observándose en todos los casos aceleraciones mucho más elevadas que el espectro de la norma para esta población.

Para determinar los sismos de control que más contribuyen al corto y largo periodo se realizó la desagregación de la peligrosidad para cada una de las ramas consideradas en el árbol lógico formulado, y en base a los resultados se definió como primer escenario (sismo probable), asociado a PR475, un sismo de Mw5.2 a una distancia de 0-10 km del caso urbano de Lorca , y como segundo escenario (sismo extremo), asociado a PR975, un sismo de Mw6.5 a una distancia de 10 a 20 km de la ciudad. Analizando la tectónica del sitio, estos escenarios se han asociado a la falla de Alhama de Murcia en sus segmentos Lorca-Totana y Goñar-Lorca, respectivamente (Figura 4.45).

REFERENTE AL ESTUDIO DE PELIGROSIDAD DETERMINISTA PARA LA CIUDAD DE LORCA, SEGÚN LOS ESCENARIOS OBTENIDOS DE LA DESAGREGACIÓN DE LA PELIGROSIDAD

Para los dos escenarios sísmicos se han obtenido espectros específicos mediante un cálculo determinista y se ha estimado el daño en términos de número de edificios y viviendas con grado de daño leve, moderado, extenso, completo y sin daños, el índice de daño medio en cada barrio, viviendas inhabitables, personas sin hogar, número de víctimas mortales y heridos, y los costes de reconstrucción y reparación de los edificios dañados.

Los espectros específicos obtenidos en cada barrio para ambos escenarios, exceden al espectro de la norma NSCE-02 para esta región, para los mismos periodos de retorno y tipos de suelo.

Para la estimación de daño, y como aporte a la metodología propuesta, se ha incorporado un árbol lógico, con ramas de acuerdo a los modelos de atenuación empleados para la simulación del sismo (ASK13, CB13, CY13 y MP12), la asignación de vulnerabilidad implementando el método estocástico de Montecarlo a través de la simulación de 100 muestras de distribución de tipologías constructivas, los dos métodos de capacidad-demanda (I-DCM y MADRS) utilizados para el cálculo del punto de desempeño de los edificios y las probabilidades de daño obtenidas para cada muestra, de las cuales finalmente se extrajo la media del número de edificios con cada grado de daño.

Para el escenario del sismo Mw 5.2, los mayores índices de daño medio resultan en los barrios de Parroquias Altas, Santiago y San Cristóbal, con valores entre 1.5 y 1.6, correspondientes a un daño medio

moderado en las edificaciones de estas zonas. El resto de barrios presenta un índice de daño medio con valores entre 0.8 y 1.5, indicativos de un daño medio ligero en las estructuras, observándose el mayor valor en el barrio de San Diego. Sin embargo, los mayores números de edificios con daño completo se obtienen en los barrios de San Cristóbal, San Mateo, Parroquias Altas y San José. Esto se debe al elevado número de edificios concentrados en estos barrios, y a la cercanía de los mismos a la falla asociada al sismo simulado. En cifras globales, se observa un total de 594 edificios que resultarían con daño completo, los cuales se corresponden con un total de 1154 viviendas.

El mayor número de viviendas inhabitables se obtiene en los barrios de San Cristóbal, San Mateo y San José, llegándose a alcanzar en el primero cifras que sobrepasan las 600 viviendas inhabitables, lo que dejaría una cifra aproximada de 1685 personas sin hogar en este barrio. En cifras globales, para el núcleo urbano de Lorca, ante este sismo, los resultados obtenidos muestran una cifra de 2870 viviendas inhabitables y 6866 personas que resultarían sin hogar.

Según los resultados obtenidos, este sismo podría generar 86 víctimas mortales y 240 heridos en la ciudad de Lorca. Llama la atención el número elevado de víctimas mortales, en comparación con las cifras observadas tras el terremoto de Lorca (9 fallecidos y 340 heridos). Sin embargo, no hay que olvidar que el número de víctimas en Lorca pudo ser mucho mayor, ya que afortunadamente las personas se encontraban fuera de los edificios por el sismo premonitor ocurridos unas horas antes.

Se estima un coste de reconstrucción de 122.5 millones de euros para los edificios y viviendas con daño completo, muy cercano al valor real de 123.4 millones de euros, correspondiente a la reconstrucción de los edificios y viviendas catalogados con color negro en el triaje del terremoto de Lorca, según las cifras de la Delegación del Gobierno de la Región de Murcia. El número de viviendas obtenido para cada grado de daño con la simulación del escenario de daño, en términos globales, es equiparable al daño real en las viviendas observado tras el terremoto de Lorca de 2011.

Para el escenario del sismo Mw 6.5, la mayor parte de los barrios presentan un índice de daño medio con valores entre 2 y 3, correspondiente a un daño moderado, aunque algunos barrios llegan a presentar daño medio extenso. Los mayores índices de daño medio se observan en los barrios de Parroquias Altas, San Fernando y Santiago. No obstante, los barrios que presentan un mayor número de edificios con daño completo son los de San Cristóbal, San Mateo y San José, debido a la mayor densidad de edificaciones y viviendas en estas áreas. El número resultante de viviendas inhabitables y personas que resultarían sin hogar para este escenario es de 12,528 viviendas y 30,854 personas. Se estiman también cifras de 345 víctimas mortales y más de 1000 heridos, y los costes asociados a la reconstrucción y reparación de los daños en los edificios de viviendas alcanzaría una cifra de 768 millones de euros.

REFERENTE A LA COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL SISMO MW5.2 SIMULADO Y LOS DAÑOS OBSERVADOS TRAS EL TERREMOTO DE LORCA DEL 11 DE MAYO DE 2011

Los resultados obtenidos con la muestra de campo y las muestras simuladas son muy similares, obteniendo en la mayoría de los casos una diferencia menor a 10 edificios para los diferentes grados de daño. El modelo de atenuación que presenta menor diferencia en los resultados es el de CB13, mostrando para el daño moderado, extenso y completo, una diferencia entre 2 y 4 edificios en cada uno de estos grados de daño. De igual manera, el modelo de CB13 es el que presenta menor diferencia con los daños observados en estos edificios según las inspecciones realizadas por el Ayuntamiento de Lorca a fecha de 15 de julio de 2011.

Con respecto al estudio de toda la ciudad, la correspondencia entre los grados de daño obtenidos del estudio y el triaje de Lorca no se puede establecer de manera fiable debido al gran número de modificaciones en la asignación de color del triaje observadas en los diferentes planos de inspección informatizados por el Ayuntamiento de Lorca durante el primer año transcurrido desde la fecha del sismo. A su vez estas modificaciones se deben a diferentes factores y conflictos de intereses.

Los edificios que resultan con daño completo según el estudio, se corresponden con el 100% de los edificios catalogados con color negro tras el triaje, a los que se añade aproximadamente un 60% de los edificios catalogados con color rojo. Los edificios con daño extenso representan el 40% restante de los edificios con color rojo más un 50% de los edificios catalogados con color amarillo. Los edificios que resultan con grado de daño moderado según el estudio se corresponden con un 50% de los edificios catalogados con color amarillo más un 20% de los edificios con asignación de color verde. Finalmente, el número de edificios restante de la simulación correspondiente a los grados de daño leve y nulo, se corresponden con los edificios catalogados en color verde según los daños cuantificados por el Ayuntamiento de Lorca.

REFERENTE AL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD DE LAS EDIFICACIONES

Los resultados obtenidos de este análisis señalan que para bases de datos con un gran número de edificios (mayores a 2000 en este caso), la aleatoriedad en la asignación de tipologías constructivas no tiene influencia en los resultados de daño, por lo cual puede despreciarse, siempre y cuando se cuente con una distribución porcentual de tipologías fiable, basada en el año de construcción. Por otro lado, el análisis demuestra la importancia de tener en cuenta esta aleatoriedad cuando la base de datos de edificios es pequeña (especialmente menor a 500).

REFERENTE A LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS Y MÉTODOS

Los resultados de daño presentan mayor variabilidad dependiendo del modelo de atenuación o GMPE que del método capacidad-demanda, lo que significa que el método en sí es menos sensible a los resultados. Los modelos de ASK13 y CB13 muestran resultados más parecidos que los obtenidos con el método de CY13, presentando este último mayor número de edificios con daño extenso y completo, y por ende, menor número con daño nulo o leve. El grado de daño moderado es muy parecido en todos los casos.

El modelo de CY13 presenta una alta variación en los resultados de daño si se toman como input sísmico los valores $\mu \pm \sigma$ del modelo, presentando un 20% de diferencia en los edificios de daño completo, con respecto a los resultados obtenidos con la media del modelo. Esto indica que la alta variabilidad de este modelo puede afectar sobremanera los resultados de riesgo.

Los resultados obtenidos de los análisis de sensibilidad realizados con los modelos y métodos pueden ser considerados a la hora de evaluar escenarios de riesgo sísmico por sismos futuros, a escala urbana, en otras localidades españolas.

En el caso de el sismo de Lorca, la cercanía a la falla responsable es un factor fundamental de amplificación de la sacudida del terreno y, por tanto, de los daños causados por el terremoto.

Por otra parte, para poder realizar estimaciones de daño y de pérdidas realistas por sismos futuros que permitan plantear medidas de mitigación del riesgo basadas en relaciones coste-beneficio, es necesario contar con bases de datos de vulnerabilidad y de costes más detalladas y completas que las que habitualmente están disponibles y accesibles.

Conviene tener en cuenta los resultados obtenidos de este estudio para la planificación urbana de la ciudad de Lorca y elaboración de planes de emergencia, así como para la evaluación de las normativas sismorresistentes establecidas actualmente para esta región. Los técnicos que participan en los equipos de valoración de los riesgos producidos durante la emergencia deben estar formados previamente con unidad de criterio y especializados en las diferentes áreas de intervención.

REFERENCIAS

- Abrahamson N.A. and Silva W.J. (2008).** Chiou–Youngs PEER-NGA empirical ground motion model for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. PEER Report Draft v2, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.
- Abrahamson N.A., Silva W.J. and Kamai R. (2013).** Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set. *PEER 2013/04*.
- Akkar S. and Boomer J.J. (2010).** Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*. 81: 195-206.
- Aki K. (1957).** Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 35, 415-457.
- Aki K. (1969).** Analysis of the Seismic Coda of Local Earthquakes as Scattered Waves. *Journal of Geophysical Research*, 74, 615-631.
- Aki K. and Larner K. L. (1970).** Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, *J. Geoph. Res.*, 75, 933-954.
- Alcalá F. J., Navarro M., García-Jerez A., Vidal F., Creus C. y Enomoto T. (2012).** Geología de la ciudad de Lorca (Murcia, España). Base para evaluar el riesgo sísmico. 7 As. Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. 25-29 Jun., 2012, San Sebastián, 4 pp.
- Anderson J. (1979).** Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 69: 135–158.
- Anderson B.J., Erlandson R.E., Engebretson M.J., Alford J. and Arnoldy, R.L. (1996).** Source region of 0.2 to 1.0 Hz geomagnetic pulsation bursts. *Geophysical Research Letters* 23: doi: 10.1029/96GL00659. issn: 0094-8276
- Ambraseys N., Douglas J., Sarma K. and Smit P. (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. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 3(1) 1-53.
- ASCE/SEI 41-06 (2007).** A New Seismic Rehabilitation Standard — ASCE/SEI 41-06 - [http://dx.doi.org/10.1061/40946\(248\)35](http://dx.doi.org/10.1061/40946(248)35).
- ATC (1985).** Earthquake Damage Evaluation Data for California. Report ATC-13, Applied technology Council, Redwood City, California.
- ATC (1996).** Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC-40, Seismic Safety Commission, SSC Rep. 96-01, 1-2, California, U.S.A.
- ATC (2000).** ATC-38: Database on the Performance of Structures Near Strong-Motion Recordings, Redwood City, CA
- ATC (2005).** ATC-55, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Report ATC-55, Applied Technology Council, Redwood City, CA, 2005.
- Atkinson G.M. and Boore D.M. (2011).** Modifications to Existing Ground-Motion Prediction Equations in Light of New Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 101: 1121-1135.
- Baker J.W. (2008).** An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). White Paper, Version 1.3, 72 pp.
- Baker J.W., Cornell C.A. and Tothong P. (2005).** Disaggregation of seismic drift hazard. *Proc.9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR05)*, Rome, Italy.
- Bath M. (1978).** A note on recurrence relations for earthquakes. *Tectonophysics*. 51: T23-T30.
- Barbat A.H. (1998).** El riesgo sísmico en el diseño de edificios, *Calidad Siderúrgica*, Madrid.
- Barbat A.H., Mena U. y Yépez F. (1998).** Evaluación probabilista del riesgo sísmico en zonas urbanas, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 14(2), 247-268.
- Bazzurro P. and Cornell C.A. (1999).** Disaggregation of seismic hazard. *Bulletin of the Seismic Society of America*, vol. 89, pp. 501-520.
- Benito B., Cabañas L., Jiménez M.E., Cabañas C, Gómez P. (2000).** MFS_Strong Motion Databank and Database. *Revista monográfica sobre Bancos de Datos del CSEM (Centro Sismológico Euro Mediterráneo)*, Newsletter No. 16.
- Benito B., Jiménez M.E (1999).** “Peligrosidad sísmica”, *Física de la Tierra* 1999, 11: 13-47; ISSN: 0214-4557.
- Bernreuter D.L., Boissonnade A.C., Short C.M. (1996).** Investigation of techniques for the development of

seismic design basis using the probabilistic seismic hazard analysis. Lawrence Livermore National Laboratory. Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington.

Bettig, B., Bard P.Y., Scherbaum F., Riepl J., Cotton F., Cornou C. and Hatzfeld D. (2001). Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): application to the Grenoble area, *Boll. Geof. Teor. Appl.* 42, 281-304

Boissonnade A., Chokshi N., Berleuter D., and Murphy A. (1995). Determination of controlling earthquakes from probabilistic seismic hazard analysis for nuclear reactor sites, *Proc. of the Thirteenth International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT 13*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, August 13-18, 771-776.

Blume J.A. (1965). Earthquake ground motion and engineering procedures for important installations near active faults. *Proc. Third World Conf. on Eq. Engr. (New Zealand)*, IV-53.

Bonilla L.F., Steidl J.H., Lindley G.T., Tumarkin A.G., and Archuleta R. (1997). Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods, *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 710-730.

Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E. and Atkinson G.M. (2013). NGA-West 2 Equations for predicting response spectral accelerations for shallow crustal earthquakes, *PEER Rpt.* 2013/05, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 135 pp.

Borcherdt R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1970, 29-61, 1970.

Borcherdt R.D. and Gibbs J.F. (1976). Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 66(2) · April 1976.

Bormann P., Baumbach M., Bock G., Grosser H., Choy G. L., Boatwright J. (2009). Seismic Sources and Source Parameters. - In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, pp. 1—94.

Bufo E. and Udías A. (2003). Mecanismos focales de terremotos en España. *Física de la Tierra*. 15: 211-227.

Bufo E., Pro C., Cesca S., Sanz C. y Udías A. (2011). Proceso de ruptura del sismo de Lorca de 11 mayo 2011. *Física de la Tierra Vol. 24* (2012) 71-82.

Bungum H. and Husebye E.S. (1979). The Meløy, northern Norway, earthquake sequence - a unique intraplate phenomenon. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 59, 189-193.

Bungum H. (2007). Numerical modelling of fault activities. *Computers and Geosciences*. 33(6): 808-820.

Calvi G.M. (1999). "A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings". *J. Earth. Eng.*, 03, 411 (1999).

Campbell K.W. and Bozorgnia Y. (2013). NGA-West2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *PEER 2013/06*

Capon J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Proceedings IEEE* 57(8), 1408-1418.

Caicedo C., Barbat H. A., Canas J. A. y Aguiar R. (1994). Vulnerabilidad sísmica de edificios. Barcelona: Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), 1994. ISBN 84-87867-43-X.

Cella F., Luzi L., Meroni F., Ober G., Pergalani F., Petrini V., Tomasoni R. and Zonno, G. (1998). SERGISAI project final report. By the partner CNR-IRRS. Final Report. Scientist in Charge: Gaetano Zonno. Contract Number: ENV4-CT96-0279. 71-220 pp.

Centre for Research on the Epidemiology Disasters - CRED (2016). Poverty & Death: Disaster Mortality 1996-2015. * Adjunto publicación Meli, R., D. Beltrán y S. Santa Cruz (2005), El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso. Naciones Unidas. Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL.

Chapman M.C. (1995). A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design. *Bulletin of the Seismic Society of America*, vol. 85, pp. 937-942.

Chávez J. (1998). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 323 pp.

Chávez-García F.J., Pedotti G., Hatzfeld D. and Bard P.Y. (1990). An experimental study of site effects near Thessaloniki (northern Greece). *Bulletin of the Seismological Society of America* 80(4), 784-806.

Chávez-García F.J. and Bard P.Y. (1994). Site effects in Mexico City eight years after the September 1985 Michoacan earthquakes, *Soil. Dyn. Earthq. Eng.*, 12,

229–247.

Chiou B. and Youngs R.R. (2008). Chiou–Youngs PEER-NGA empirical ground motion model for the average horizontal component of peak acceleration and pseudo-spectral acceleration for spectral periods of 0.01 to 10 seconds. *PEER Report Draft, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA*

Chiou B.S.J. and Youngs R.R. (2013). Update of the Chiou and Youngs NGA Ground Motion Model for Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *PEER 2013/07*

Chiou B.S.J., Youngs R.R., Abrahamson N.A. and Addo K. (2010). Ground-motion attenuation model for small-to-moderate shallow crustal earthquakes in California and its implications on regionalization of ground-motion prediction models. *Earthquake Spectra*. 26: 907 – 926.

Cho I., Tada T. and Shinozaki Y. (2004). A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms. *Geophysics* 69(6), 1535-1551.

Cho I., Tada T. and Shinozaki Y. (2006a). Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, *J. Geophys. Res.* 111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235.

Cho I., Tada T. and Shinozaki Y. (2006b). A generic formulation for microtremor exploration methods using three-component records from a circular array, *Geophys. J. Int.* 165, 236- 258.

Chinnery M.A. and North R.G. (1975). The frequency of very large earthquakes. *Science*. 190: 1197–1198.

Coburn A.W., Spence R.J.S. y Pomonis A. (1991). Vulnerabilidad y evaluación de riesgo. Cambridge Architectural Research Limited The Oast House, Maling Lane, Cambridge, U.K.

Cornell (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606. October.

Corsanego. A and Petrini, V. (1990). Seismic vulnerability of buildings. In: *Proceedings of the SEISMED 3*. Trieste, Italia.

Cosentino P., Ficarra V. and Luzio D. (1977). Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 67, No. 6, pp. 1615-1623. December 1997.

Crespo M.J. (2011). Análisis de la peligrosidad sísmica en la Península Ibérica con un método basado en estimadores de densidad Kernel. Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).

Dreger D. and Helmberger D. (1993). Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data. *Journal of Geophysical Research* 98, pp. 8107-8125.

D'Ayala D., Spence R, Oliveira C.S. (1997). TOSQA Project, Earthquake Protection for Historic Town Centres: The Case of the Alfama, Lisbon. Final Report.

De Vicente G., Cloetingh S., Van Wees J.D., Cunha P.P. (2011). Tectonic classification of Cenozoic Iberian foreland basins. *Tectonophysics* 502(1–2):38–61

Dolce M., Kappos A., Zuccaro G. and Coburn, A., (1994). Report of the EAEE working group 3: vulnerability and risk analysis, Technical Report 10th european conference on Earthquake Engineering. Vienna, 4, 3049–3077.

Echeverría A., Khazaradze G., Asensio E., Gárate J., Dávila J.M., Suriñach E. (2013). Crustal deformation in eastern Betics from CuaTeNeo GPS network. *Tectonophysics* 608 (2013) 600–612.

Echeverría A., Khazaradze G., Asensio E., Masana E. (2015). Geodetic evidence for continuing tectonic activity of the Carboneras fault (SE Spain). *Tectonophysics*. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.08.009.

Esteva L. (1968). Bases para la formulación de diseño sísmico. *Natl. Univ. México, Inst. Eng. Rep.* 182.

European Standard EN 1998-1: 2005 Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, Seismic action and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

European Standard EN 1998-3: 2005 Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

Fajfar P. and Gaspersic P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 23-67.

Fajfar P. (2002). Seismic analysis of eccentric R/C buildings by the N2 method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.

FEMA-356 (2000). FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, ASCE for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., November 2000.

FEMA-440 (2005). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. Technical report. Applied Technology Council (ATC), California, USA. pp. 392.

FEMA 450-2 (2003). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures.

FEMA/NIBS (1999). Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences (1999). HAZUS' 99 Technical Manual. Earthquake Loss Estimation Methodology, vol. 1-3. Washington, D.C., USA. pp.

FEMA/NIBS (2009). NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures FEMA P-750 / 2009 Edition.

Field. E.H. and Jacob K.H. (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, Bull. Seism. Soc. Am. 85, 1127-1143

Flores C. (1973). Arquitectura popular española 5. Carlos Flores López Aguilar 84-03-80010-X

Fournier d'Albe E.M. (1982). An approach to earthquake risk management. Engineering Structures, Publisher: Elsevier.

Frankel A., Thenhaus A.P. and Jacob K. (1995). Seismic hazard mapping in the northeastern United States, NCEER Bulletin, v. 9, number 1, 13-16.

Frankel A., Carver D., Cranswick E., Bice T., Sell R. and Hanson Y. (2001). Observations of basin ground motions from a dense seismic array in San Jose, California, Bull. Seism. Soc. Am. 91, 1-12.

Freeman S.A. (1988). The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design, Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, September 6-11th 1998, Paris, A.A.Balkema, 1998.

García-Jerez A, Luzón F., Navarro M. and Pérez-Ruiz J.A. (2006a). Characterization of the sedimentary cover of the Zafarraya basin (Southern Spain) by means of ambient noise. Bull. Seismol. Soc. Am. 96, 957-967.

García-Jerez A., Luzón F., and Navarro M. (2006b). Computation of dispersion curves for Rayleigh and Love waves using horizontal components of seismic microtremor, in Proc. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA, April 2006, paper N. 1377.

García-Jerez A., Navarro M., Alcalá F. J., Luzón F., Pérez-Ruiz J. A., Enomoto T., Vidal F. y Ocaña E. (2007). Shallow velocity structure using joint inversion of array and H/V spectral ratio of ambient noise: the case of Mula town (SE of Spain). Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27, 907-919.

García-Jerez A., Luzón F., Navarro M. and Pérez-Ruiz J. A. (2008a). Determination of elastic properties of

shallow sedimentary deposits applying a spatial autocorrelation method, Geomorphology 93, 74-88.

García-Jerez A., Luzón F. and Navarro M. (2008b). An alternative method for calculation of Rayleigh and Love wave phase velocities by using three-component records on a single circular array without a central station, Geophys. J. Int. 173(3), 844-858

García-Jerez A. (2010). Desarrollo y Evaluación de Métodos Avanzados de Exploración Sísmica Pasiva. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.

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. and Giner-Robles J.L. (2006). Definición de zonas sísmogénicas en base al gradiente geotérmico, resistencia y profundidad del límite frágil-dúctil en la corteza superior. Aplicación metodológica para el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Sureste de España. *Geogaceta*. 39: 55-58.

García-Mayordomo J., Insua-Arévalo J., Martínez-Díaz J., Perea H., Álvarez-Gómez J.A., Martín-González F., González A., Lafuente P., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Giner-Robles J., Azañón J.M., Masana E. and Moreno X. (2010). Modelo integral de zonas sísmogénicas de España. *Resúmenes de la 1ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología, Sigüenza, España*.

García-Mayordomo J., Insua-Arévalo J.M., Martínez-Díaz J.J., Jiménez-Díaz A., Martín-Banda R., Martín-Alfageme S., Álvarez-Gómez J.A., Rodríguez-Peces M., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Masana E., Perea H., Martín-González F., Giner-Robles J., Nemser E.S., Cabral J. and the QAFI Compilers. (2012a). La Base de Datos de Fallas Activas en el Cuaternario de Iberia (QAFI v.2.0). *Journal of Iberian Geology*, 38(1), 285-302.

García-Mayordomo J., Martínez-Díaz J.J., Capote R., Martín-Banda R., Insua-Arévalo J.M., Álvarez-Gómez J.A., Perea H., González A., Lafuente P., Martín-González F., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Giner-Robles J., Azañón J.M., Masana E., Moreno X., Benito B., Rivas A., Gaspar-Escribano J.G., Cabañas L., Vilanova S., Fonseca J., Nemser E. and Baize S. (2012b). Modelo de Zonas Sísmogénicas para el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en España. *7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia 2012*.

García-Mayordomo J. and Martín-Banda R. (2012). QAFI v.2. User's guide, In: <http://info.igme.es/qafi> - Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

García-Mayordomo J. and Martín-Banda R. (2015). QAFI v.3. User's guide, In: <http://info.igme.es/qafi> - Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. doi: 10.13140/RG.2.1.3534.2569.

Gaspar-Escribano J., Navarro M., Benito B., García-Jerez A., Vidal F. (2010). From Regional- to Local-Scale Seismic Hazard Assessment: Examples from Southern Spain. *Bulletin of Earthquake Engineering*. Vol. 8, pp. 1547–1567.

Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (2011). United Nations Publication. ISBN 978-92-1-132030-5

Gonzalez. P.J., Fern.Indez. J. (2011). Drought-driven transient aquifer compaction imaged using multitemporal satellite radar interferometry. *Geology* 39. 551-554. <http://dx.doi.org/10.1130/G31900.1>.

Gutenberg, B. and Richter C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California, *Bull Seism. Soc. Am.* 34, 185-188.

Guttenberg B. and Richter C.F. (1956). Magnitude and energy of earthquakes. *Annali di Geofisica*, 9, pp. 1-15.

Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg. pp.

Grupo de Trabajo IGN-UPM (2013). Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012. Editorial Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid. ISBN: 978-84-416-2685-0.

HAZUS-MH (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Technical manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington DC, USA. pp. 712.

Hanks T. C. and Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research* 84, pp. 23480-23500.

Hanyga A., Lenartiwicz E. and Pajchel J. (1985). Physics and evolution of the Earth's interior 2. Seismic wave propagation in the Earth, R. Teisseyre (Series Ed.), A. Hanyga (2 Volume Ed.), Elsevier Science Pub. Co., Inc. New York.

Harmsen S., Perkins D. and Frankel A. (1999). Disaggregation of probabilistic ground motions in the central and eastern United States. *Bulletin of the Seismic Society of America*, vol. 89, pp. 1-13.

Hanks T.C. and Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 84: 23480-23500.

Hazus-MH (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Technical manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington DC, USA. pp. 712.

Henstridge J. D. (1979). A signal processing method

for circular arrays, *Geophysics* 44, 179- 184.

Hermanns L., Fraile A., Alarcón E., Álvarez R. (2013). "Performance of buildings with masonry infill walls during the 2011 Lorca earthquake." *Bulletin of Earthquake Engineering*. 12 - 5, pp. 1977 - 1997. 2013.

Idriss I.M. (2008). An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes, *Earthquake Spectra*. 24: 217-242.

Idriss I.M. (2013). NGA-West2 Model for Estimating Average Horizontal Values of Pseudo-Absolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes. *PEER 2013/08*.

International Building Code. International Code Council; 2015 ed. edition (5 Jun. 2014). ISBN-10: 1609834682.

IGME y ENRESA (1998). Mapas Neotectónico y Sismotectónico de España a escala 1:1.000.000. Vol. I (237 pp.) and Vol. II (167 pp.). Disponible en www.igme.es y [http://info.igme.es/qafi\(descargas\)](http://info.igme.es/qafi(descargas)).

Isobe T., Feigelson E.D., Akritas M.G. and Babu G.J. (1990). Linear Regression in Astronomy I. The *Astrophysical Journal*. 364: 104-113.

Jackson P.S. (1971). The focusing earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 61, 685-695.

Jaiswal K. S., Wald D. J. and Porter K. A. (2010). A Global Building Inventory for Earthquake Loss Estimation and Risk Management. *Earthquake Spectra*. Volume 26, No. 3, pages 731–748, August 2010; © 2010, Earthquake Engineering Research Institute.

Kale O. and Akkar S. (2012). A Method to determine the appropriate GMPES for a selected Seismic Prone Region. *Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.

Kanli A.I., Tildy P., Prónay Z., Pinar A. and Hermann L. (2006). VS 30 mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey; *Geophys. J. Int.* 165, 223–235.

Kayen R., Carkin B.A., Allen T., Collins C., McPherson A., y Minasian D. (2014). Shear-Wave Velocity and Site-Amplification Factors for 50 Australian Sites Determined by the Spectral Analysis of Surface Waves Method. U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1264, 118 p.

Ke G., Dong H., Kristensen A., Thompson M. (2011). Modified Thomson–Haskell Matrix Methods for Surface-Wave Dispersion-Curve Calculation and Their Accelerated Root-Searching Schemes. *Bulletin of the Seismological Society of America* August 2011

101:1692-1703; doi: 10.1785/0120100187.

Kijko A. and Graham G. (1999). Parametric-Historic. Procedure for Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Part II: Assessment of Seismic Hazard at Specified Site, *Pure and Appl. Geophys.*, 154, 1–22, 1999.

Kimball, J. K. and H. Chander (1996). Department of Energy seismic siting and design decisions: consistent use of seismic hazard analysis, Proc. Twenty-Fourth Water Reactor Safety Information Meeting 3, 141-160, Bethesda, October 21-23, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CP-0157.

Köhler A., Ohrnberger M., Scherbaum F., Wathelet M. and Cornou C. (2007). Assessing the reliability of the modified three-component spatial autocorrelation technique, *Geophys. J. Int.*, 168(2), 779-796.

Kolmogorov, A. (1933). Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione, *1st. Ital. Attuari. G.*, 4. 1–11.

Kosloff R. and Baysal E. (1982). Forward modeling by a Fourier method. *Geophysics* 52, 1402- 1412

Kramer S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering mechanics series. ISBN 0-13-374943-6.

Lachet C. and Bard P.Y. (1994). Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique, *J. Phys. Earth* 42, 377-397.

Lagomarsino, S. and Giovinazzi S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull Earthquake Eng.*, vol. 4, pp. 415-443.

Langston C.A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, *J. Geophys. Res.* 84, 4749-4762

Lantada M.N. (2007). Tesis doctoral "evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona". Departamento de Ingeniería del terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña.

Lawson R.S., Vance V. and Krawinkler H. (1994). Nonlinear static pushover analysis—why, when and how?, *Proc., 5th U.S. Conf. Earthq. Engrg.* 1:283-292.

Lapajne J.K., Motnikar B.S., and Zupanc P. (2003). Probabilistic Seismic Hazard Assessment Methodology for Distributed Seismicity, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 93, 2502–2515.

Lee V.W. (1984). Three-dimensional diffraction of plane P, SV & SH waves by a hemispherical alluvial

valley. *Soil Dyn. Earthq. Engrg.*, 3, 133-144

Lehman E., Leighton T. and Meyer A.R. (2010). Mathematics for Computer Science. Massachusetts Institute of Technology.

Leonard M. (2010). Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100, no. 5A, 1971–1988.

Lermo J.F. and Chávez-García F.J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 1574-1594.

Litchfield N., Berryman K., Christophersen A., Stein R. and Willis M. (2011). Inventory of existing fault databases and data attributes, GEM Faulted Earth, Available from www.nexus.globalquakemodel.org/gem-faulted-earth/posts/

LLNL (1989). Environmental Report for 1989. Lawrence Livermore National Lab., CA (USA)

Loh, C.H. and Wu T.C. (1998). Prediction on site effects from seismic motions. The effects of surface geology on seismic motion, A.A. Balkema, Rotterdam, 2, 567-574.

López C. (2008). Nuevas fórmulas de magnitud para la Península Ibérica y su entorno. Trabajo de investigación del Máster en Geofísica y Meteorología. Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.

López Arroyo A. y Villacañas J. (1999). Metodología Simplificada para el Análisis del Riesgo Sísmico. Física de la Tierra. ISSN 0214-4557.

López-Comino J.A., Mancilla F.L., Morales J. and Stich D. (2012). Rupture directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca earthquake (Spain). *Geoph. Res. Lett.* 39, L03301, 5 PP. doi:10.1029/2011GL050498.

Louie J. N. (2001). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91, 347-364.

Luzón F. (1995). Determinación de la respuesta sísmica de estructuras geológicas superficiales mediante el método indirecto de elementos en la frontera, PhD thesis, University of Granada, Spain (in Spanish).

Luzón F., Aoi S., Fäh D., Sánchez-Sesma F.J. (1995). Simulation of the seismic response of a 2D sedimentary basin: A comparison between the Indirect Boundary Element Method and a Hybrid Technique. *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1501-1506.

- Luzón F., Gil-Zepeda S. A., Sánchez-Sesma F. J., and Ortiz-Alemán C. (2004).** Threedimensional simulation of ground motion in the Zafarraya basin (Southern Spain) up to 1.335 Hz under incident plane waves, *Geophys. J. Int.* 156, 584-594.
- Luzón F., Almendros J., García-Jerez A. (2010).** Shallow structure of Deception Island volcano, Antarctica, from correlations of ambient seismic noise on a dense set of seismic arrays. *Geophysical Journal International*. Submitted.
- Main I.G. and Burton P.W. (1981).** Rates of crustal deformation inferred from seismic moment and Gumbel's third distribution of extreme magnitude values. In: Beavers, J.E. (Ed.), *Earthquakes and Earthquake Engineering: The Eastern United States*, London. 2: 937-951.
- Margottini, C., Molin D., Narcisi B. and Serva L. (1987).** Intensity vs. acceleration: Italian data. *Proceedings of the Workshop on Historical Seismicity of Central-Eastern Mediterranean Region*. ENEA-IAEA, Roma, pp. 213-226.
- Martínez-Díaz J.J. (2002).** Stress field variation related to fault interaction in a reverse oblique-slip fault: the Alhama de Murcia fault, Betic Cordillera, Spain. *Tectonophysics* 356, 291-305.
- Martínez-Díaz J.J., Masana E., Hernández-Enrile J.L. and Santanach P. (2003).** Effects of repeated palaeoearthquakes on the Alhama de Murcia Fault (Betic Cordillera, Spain) on the Quaternary evolution of an alluvial fan system. *Ann. Geophys* 46 (5), 775-792. 2003.
- Martínez-Díaz J.J. and Álvarez-Gómez J. A. (2011).** Seismotectonic characterization of the seismic series of Lorca and geological analysis of the earthquake source. In *Geological preliminary field report of the Lorca earthquake (5.1 Mw, 11th may 2011)*, Instituto Geológico y Minero de España. Internal Report. <http://www.igme.es>. Accessed 14 february 2012.
- Martínez-Díaz J.J., Masana E. and Ortuño M. (2012).** Active tectonics of the Alhama de Murcia fault, Betic Cordillera, Spain. *Journal of Iberian Geology* 38(1), 10.5209/ rev_JIGE.2012.v38.n1.39218.
- Martínez-Pagán P., Navarro M., Pérez-Cuevas J., García-Jerez A., Alcalá F.J., Sandoval-Castaño S. and Alhama I. (2012).** Comparative Study of SPAC and MASW Methods to Obtain the Vs30 for Seismic Site Effect Evaluation in Lorca town, SE Spain. *Near Surface Geoscience 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Martínez-Pagán P., Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., Manteca J.I., Rosique M. (2013).** The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the Victoria Cave, Cartagena (SE Spain). *Eng. Geol.* 156, 1-10.
- Martínez-Pagán P., Navarro M., Pérez-Cuevas J., Alcalá F.J., García-Jerez A., Sandoval-Castaño S. (2014).** Shear-wave velocity based seismic microzonation of Lorca city (SE Spain) from MASW analysis. *Near Surface Geophysics* 12(2046). DOI: 10.3997/1873-0604.2014032
- Martínez-Solares J.M. (2003).** Sismicidad histórica de la Península Ibérica. *Física de la Tierra*. 15: 13-28.
- McGuire R.K. (1995).** Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *Bulletin of the Seismic Society of America*, vol. 85, pp. 1275-1284.
- Mezcua, J. y J.M. Martínez Solares (1983).** Sismicidad en el área Ibero-Mogrebí. Instituto Geográfico Nacional. Publicación Técnica Nº 203. Madrid.
- Medvedev S. V. (1953).** A new seismic scale, *Tr. Geofiz. Inst., Akad. Nauk SSR*, 21, (148).
- Medvedev S. V. (1962).** *Inzhenernaya seismologhia*. Moscow: Gosstroyizdat.
- Medvedev S., Sponheuer W. and Karník V. (1965).** Seismic intensity scale version MSK 1964, UNESCO, informe WS/0565.43 AVS, Paris, 1-7
- Milutinovic Z.V. y Trendafiloski G.S. (2003).** "An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP4: Vulnerability of current buildings". pp. 110.
- Mouroux P., Bertrand M., Bour M., Brun B. L., Depinois S., Masure P. y Risk-UEteam (2004).** The European Risk-UE Project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. *Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá), CD-ROM, Paper No. 3329*.
- Mouroux P. & Brun B.L. (2006).** An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. *Bull Earthquake Eng* (2006) 4: 323. DOI: 10.1007/s10518-006-9020-3
- Morikawa H. and Udagawa S. (2009).** A Method to Estimate the Phase Velocities of Using a Time-Frequency Analysis and Its Applications *Bull. Seismol. Soc. Am.* 99, 774 - 793.
- Murphy J.R. and Shah H.K. (1988).** An analysis of the effects of site geology on the characteristics of near-field Rayleigh waves, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 78, 65-82.
- Murphy P. (2008).** Informe final proyecto RISNA. Evaluación del Riesgo Sísmico en Navarra. Volumen 2: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica. 63 pp.

Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Rept. RTRI, Jpn*, 30, pp. 25-33.

National Research Council (NRC) (1988). Probabilistic seismic hazard analysis, Rept. of the Panel on Seismic Hazard Analysis, National Academy Press, Washington, D.C.

Navarro M., Corchete V., Badal J. I., Pujades L., Canas J. A. and Vidal F. (1997). Inversion of Rg waveforms in southern Spain, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 87, 847-865.

Navarro M., Sánchez F.J., Enomoto T., Vidal F., Rubio S. (2000). Relation between the predominant period of soil and the damage distribution after Mula 1999 earthquake. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation*, Palm Spring, California, USA, 2000.

Navarro M., Enomoto T., Sánchez F.J., Matsuda I., Iwatate T., Posadas A., Luzón F., Vidal F., and Seo, K. (2001). Surface soil effects study using short-period microtremor observations in Almería City, Southern Spain, *Pure Appl. Geophys.* 158, 2481-2497.

Navarro M., García-Jerez A., Vidal F., Enomoto F., Alcalá-García F.J., Yamamoto T., Perez-Ruiz J.A., Luzón F. (2006). Evaluation of local site effect in Mula town (Murcia, Spain) applicable to seismic risk management. In: *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, 2006, paper 910.

Navarro M., Vidal F., Enomoto T., Alcalá F.J., Sánchez F.J. and Abeki N. (2007). Analysis of site effects weightiness on RC building seismic response. The Adra (SE Spain) example. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36: pp. 1363- 1383.

Navarro M., García-Jerez J.A., Alcalá F.J., Vidal F., Enomoto T., Luzón F. and Creus C. (2008). Vs30 Structure of Lorca town (SE Spain) from Ambient Noise Array Observations. 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC 2008, Hersonissos, Crete, Greece.

Nocquet J.M. (2012). Present-day kinematics of the Mediterranean: a comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics*, 579 (SI), 220-242. ISSN 0040-1951

NEHRP (1997). Recommendation Provision for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures. Building Seismic Safety Council, Washington, D. C Federal Emergency. FEMA

NEHRP (2003). Council, B. S. S. (2003). NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures. Federal Emergency Management Agency.

NEHRP (2009). Council, B. S. S. (2009). NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures. Federal Emergency Management Agency.

Newmark N.M. (1959). A method of computation for structural dynamics. *Am. Soc. Civil Eng. Mech. Div.* 85, 67-94.

Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07) (2007). Real Decreto 637/2007, de 18 de mayo, por el que se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente: puentes. *Boletín Oficial del Estado* 132: 24044- 24133.

Norma de la Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) (2002). Real Decreto 997/2002, de 27 de Septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación. *Boletín Oficial del Estado*: 244: 35898-35967.

Norma de la Construcción Sismorresistente Española (NCSE-94) (1994). Real Decreto 2543/1994, de 27 de diciembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 33: 3935-3980.

Novotny O. (1999). Seismic surface waves. Universidade Federal Da Bahia. Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia.

NRC-DOE-EPRI (1997) Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts: Appendices. Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC).

Okada H., Matsushima T, Moriya T. and Sasatani T. (1990). An exploration technique using long-period microtremors for determination of deep geological structure under urbanized area, BUTSURI-TANSA (Geophysical Exploration), 43, pp402-417(in Japanese).

Okada H. (2003). The Microtremor Survey Method (translated by Koya Suto). Geophysical Monograph Series, No.12, Society of Exploration Geophysicists.

Okada H. (2006). Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method, *Exploration Geophysics* 37, 73-85.

Okada H. and Matsushima T., (1989). An exploration method using microtremors (1) - an analytical background to discriminate Love wave in microtremors -. *Proc. 81st Annual Meeting for Society of Exploration Geophysicist of Japan*, pp. 15-19, (in Japanese).

Okazaki, K. y RADIUS, T. (2000). RADIUS initiative for IDNDR- How to reduce urban seismic risk. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland,

New Zealand, CD-ROM

Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V. and Meletti C. (2013). CRISIS2008: A Flexible Tool to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment. *Seismological Research Letters*, 84-3: 495-504.

Ortuño M., Masana E., García-Meléndez E., Martínez-Díaz J.J., Štěpánková P., Cunha P., Sohbati R., Canora C., Buylaert J.P. and Murray A.S. (2012). An exceptionally long paleoseismic record of a slow-moving fault: the Alhama de Murcia fault (Eastern Betic Shear Zone, Spain). *Geological Society of America Bulletin*, en prensa. Doi:10.1130/B30558.1.

Park C.B., Miller R.D. and Xia J. (1999) Multi-channel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 63(3), 800-808.

Parolai S., Picozzi M., Richwalski S. M. and Milkereit C. (2005). Joint inversion of phase velocity dispersion and H/V ratio curves from seismic noise recordings using a genetic algorithm, considering higher modes, *Geophys. Res. Lett.* 32, L01303, doi: 10.1029/2004GL021115.

Pérez-Ruiz J.A. (2007). Un método de diferencias finitas para el análisis de la propagación de ondas. Aplicación al modelado de la respuesta sísmica de estructuras geológicas en entornos de computación en paralelo. PhD thesis, Universidad de Almería, España.

Picozzi, M., Parolai S., Bindi D. and Strollo A. (2009). Characterization of shallow geology by high-frequency seismic noise Tomography. *Geophys. J. Int.* 176, 164-174.

Powell G.H. (2006). Static pushover methods - explanation, comparison and implementation. *Proceedings of the 8th U.S. National conference on Earthquake Engineering*, Paper no. 1608.

RADIUS (2000). Risk Assessment tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic Disasters (2000), <http://www.geohaz.org/contents/projects/radius.html> (último acceso 16 de marzo de 2007)

Ramírez M.S., Castañón A., Plaza J. y Benito B. (2008). Proyecto Expel Sistema experto de análisis probabilista de la peligrosidad sísmica. Consejo de Seguridad Nuclear Documentos I+D Referencia: DID-16.08.

Rao N.P., Kumar M.R., Seshunarayana T., Shukla A.K., Surech G., Pandey Y., Raju R.D., Pimprikar S.D., Das C., Gahalaut K., Mishra P.S. and Gupta H. (2011). Site amplification studies towards seismic microzonation in Jabalpur urban área, central India. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1247-1258.

RG 1165 (1997). Regulatory Guide (RG) 1.165

Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Office of Nuclear Regulatory Research.

Richter, C. F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 25, Nº1, pp. 1-32.

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), <http://www.risk-ue.net/> (último acceso 23 de marzo de 2007).

RISMUR I (2008). Estudio de Riesgo Sísmico en la provincia de Murcia (Proyecto RISMUR). Broadway Malyan, Grupo de Tectónica Activa y Paleosismicidad (UCM), Grupo de Ingeniería Sísmica (UPM)

RISMUR II (2014). Servicio de Actualización del Análisis de Riesgo Sísmico (RISMUR) en la Región de Murcia. ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM), Grupo de Ingeniería Sísmica (UPM)

Rivas-Medina A. (2014). Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM).

Rueda, J. and J. Mezcua (2005). Near-real-time seismic moment-tensor determination in Spain. *Seismological Research Letters* 76, pp. 455-465.

Rueda J., Mezcua J. and García-Blanco R.M. (2011). Directivity effects of the May 11, 2011 Lorca (Spain) Mw=5.1 earthquake. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2011*, abstract #S52B-2277.

Ruiz S., Cantero A., Rivas-Medina A., Gaspar-Escribano J.M. and Benito B. (2012). Desarrollo de un modelo de movimiento fuerte utilizando datos acelerométricos españoles y contraste de otros modelos mediante análisis estadístico de residuos con datos locales. *7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia 2012.*

Sánchez-Sesma F. J. (1987). Site effects on strong ground motion. *Int.J. Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 6, 124-132.

Sandoval-Castaño S., Martínez-Pagán P., Alcaraz-Aparicio M., Pérez-Cuevas J. and Alhama-Manteca I. (2011). Zonificación sísmica de la región de Lorca mediante el método del gradiente topográfico. *Ingeopres*, 208, 22-24.

Santoyo M.A. (2013). Finite fault analysis and near field dynamic strains and rotations due to the

11/05/2011 (Mw5.2) Lorca Earthquake, South-Eastern Spain. *Bulletin of Earthquake Engineering* October 2014, Volume 12, Issue 5, pp 1855–1870.

Sanz de Galdeano C. and López-Casado C. (1988). Fuentes Sísmicas en el Ámbito Bético-Rifeño. *Revista de Geofísica*. 44: 175-198.

Shapiro N.M. and Campillo M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491, 2004.

Satoh, T., Kawase H. and Matsushima S. (2001a). Differences between site characteristics obtained from microtremors, S-waves, P-waves, and Cudas, *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 313-334.

Schmidt V. (2012). Determinación del parámetro Vs30 usando los Métodos Fk y Spac en la Bahía de Cádiz (Sur De España). *Ingeniería* 22 (1): 39-54, ISSN: 1409-2441; 2012. San José, Costa Rica.

SERGISAI (1998). SEismic Risk evaluation through integrated use of Geographical Information Systems and Artificial Intelligence techniques. (1998), Commission of the European Communities Directorate General XII for Science, Research and Development.

SESAME (2005). Final report WP13: recommendations for quality array measurements and processing. SESAME, European project, WP13, Deliverable D24.13.

Sha Y. and Bolt B.A. (1980). The standard error of the magnitud-frequency b value. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 72: 1677-1687.

Shapiro N.M., Singh S.K., Almora D. and Ayala M. (2001). Evidence of the dominance of higher-mode surface waves in the lake-bed zone of the Valle of Mexico. *Geophys. J. Int.* 147, 517-523.

Scherbaum F., Cotton F., Smit P. (2004). On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: The case of rock motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004.

Singh S. K., Mena E., and Castro R. (1988). Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion in and near Mexico City from strong motion data, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 78, 451-477.

SISMOSAN (2007). Evaluación de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Andalucía. Informe Final. Volumen 4. 164 pp.

Srivastava S.P., Roest W.R., Kovacs L.C., Oakey G., Levesque S., Verhoef J. and Macnab R. (1990). Motion of Iberia since the Late Jurassic; results from detailed aeromagnetic measurements in the Newfoundland Basin. *Tectonophysics*. 184 (3–4): 229–260.

Stephens M.A. (1992). An appreciation of Kolmogorov's 1933 paper. TECHNICAL REPORT NO. 453 JUNE 15, 1992. Department of Statistics Stanford University, Stanford, California.

Stepp J.C. (1972). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effects on statistical estimates of earthquake hazard. *Proceedings of First Int. Conference on Microzonation*. 2: 897-910.

Stich D., Martín R. and Morales J. (2010). Moment tensor inversion for Iberia-Maghreb earthquakes 2005-2008. *Tectonophysics*. 483: 390-398.

Stirling M.W., McVerry G.H. and Berryman K.R. (2002). A new seismic hazard model of New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 92: 1878-1903.

Stirling, M. W., M. C. Gerstenberger, N. J. Litchfield, G. H. McVerry, W. D. Smith, J. Pettinga, and P. Barnes (2008). Seismic hazard of the Canterbury region, New Zealand: New earthquake source model and methodology. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*. 41: 51–67.

Stirling, M., Goded, T., Berryman, K., & Litchfield, N. (2013). Selection of Earthquake Scaling Relationships for Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 103(6): 2993-3011.

Tada T., Cho I. and Shinozaki Y. (2006). A two-radius circular array method: Inferring phase velocities of Love waves using microtremor records. *Geophysical Research Letters* 33: doi: 10.1029/2006GL025722. issn: 0094-8276.

Tada T., Cho I. and Shinozaki Y. (2007). Beyond the SPAC method: exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97, 2080- 2095.

Teng T.-L. and Aki K. (1996). Preface to the 1994 Northridge earthquake special issue *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, S1 - S2.

Tiedemann H. (1992). Global earthquake and seismic index maps and catalogue. *Proc. 10th WCEE*, 10: 6195-6198.

Tinti S., Mulargia F. (1985). An improved method for the analysis of the completeness of a seismic catalogue. *Lett. al nuovo cim. Series 2*. 42(1) 21-27.

Toki K., Irikura K. and Kagawa T. (1995). Strong

motion data recorded in the source area of the Hyogoken-nanbu earthquake, January 17, 1995 Japan, *J. Natural Disaster Sci.* 16, 23-30.

Trifunac M.D. (1971). Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.* 61, 1755-1770.

Tsai V.C. and Moschetti M.P. (2010). An explicit relationship between time-domain noise correlation and spatial autocorrelation (SPAC) results. *Geophys. J. Int.* (2010) 182, 454–460

UNDRO (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Informe de la Reunión del Grupo de Expertos 9-12 de Julio, 1979, Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en casos de Desastre, Ginebra.

Uniform Building Code UBC (1997). ICC (Distributed by Cengage Learning); 75 edition (April 1997). ISBN-10: 188459087X

Unión Interparlamentaria (2010). La Reducción del Riesgo de Desastres: Un Instrumento para alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio Kit de Cabildeo para Parlamentarios Publicado por la UIP y la UNISDR. Ginebra, Suiza, Setiembre de 2010.

Vacareanu R., Radulian M., Iancovici M., Pavel F. and Neagu C. (2015). Fore-arc and back-arc ground motion prediction model for Vrancea intermediate depth seismic source. *J Earthq Eng* 19:535–562

Veith K.F. and Clawson G.E. (1972). Magnitude from short period P-wave data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 62 Nº 2, pp. 435-452.

Viktorov I.A. (1967). Rayleigh and lamb waves—Physical theory and applications, New York, Plenum Press, 154 p.

Vissers R.L.M. and Meijninger B.M.L. (2011). The 11 May 2011 earthquake at Lorca (SE Spain) viewed in a structural-tectonic context. *Solid Earth*, vol. 2, 199-204, doi: 10.5194/se-2-199-2011.

Wald D. J (2010). PAGER-Rapid Assessment of an Earthquakes Impact. in *Encyclopedia of solid Earth Geophysics*, Harsh Gupta(Ed.),Springer, Part 5, 243-245, DOI: 10.1007/978-90-481-8702-7 183.

Wald, D.J., Jaiswal, K.S., Marano, K.D., Bausch, D.B., and Hearne, M.G (2010). PAGER — Rapid assessment of an earthquake's impact. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2010–3036, 4 p.

Wang Z. (2005). A Clear Definition of Seismic Hazard and Risk: A Basis for Hazard and Risk Assessment, Communication, and Management. American Geophysical Union, Fall Meeting 2005, abstract #S53B-1110

Wells D.L. and Coppersmith K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *B Seismol Soc Am* 84:974–1002.

Whitman R., Reed J. and Hong S. (1973). Earthquake Damage Probability Matrices, Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Roma, Italia, 2, 2531-2540

Wilches-Chaux G., (1989). Herramientas para la Crisis: Desastres, Ecologismo y Formación Profesional; Popayan: Sena.

Wills C.H. and Silva W. (1998). Shear-Wave Velocity Characteristics of Geologic Units in California. *Earthquake Spectra*: August 1998, Vol. 14, No. 3, pp. 533-556.

Woo G. (1996). Kernel estimation methods for seismic hazard area source modeling. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1-10.

Wong H.L. and Trifunac M.D. (1974). Surface motion of a semi-elliptical for incident plane SH wave. *Bull. Seism. Soc. Am.* 64 1389-1403.

Wood H.O. (1908). Distribution of apparent intensity in San Francisco, in The California earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission: Carnegie Inst. Washington Pub. 87, p. 220-245.

Wooddell K.E. and Abrahamson N.A. (2012). New earthquake classification scheme for mainshocks and aftershocks in the NGA-West2 ground motion prediction equations (GMPes), Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.

Woessner, J., and S. Wiemer (2005), Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95, doi: 10.1785/0120400007

Woessner J., Laurentiu D., Giardini, D. et al. (2015). *Bull Earthquake Eng* 13: 3553. Doi: 10.1007/s10518-015-9795-1

Woessner J, Danciu L, Giardini D, Crowley H, Cotton F, Grünthal G, Valensise G, Arvidsson R, Basili R, Demircioglu MB, Hiemer S, Meletti C, Musson RMW, Rovida AN, Sesetyan K, Stucchi M, the SHARE Consortium (2015). The 2013 European seismic hazard model: key components and results. *B Earthq Eng* 13:3553–3596

Yépez F., Barbat Alex. y Canas J. (1996). Simulación de escenarios de daño sísmico en zonas urbanas, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño de la Ingeniería*, 12(3), 331-358.

Zeck H.P., Kristensenb A.B., Williams I.S. (1998).

Post-collisional volcanism in a sinking slab setting—
crustal anatexis origin of pyroxene-andesite magma,
Caldear Volcanic Group, Neogene Alborán volcanic
province, southeastern Spain. Elsevier Lithos
December 1998. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00047-4)

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. MORTALIDAD POR CADA 100.000 HABITANTES EN LOS 10 PAÍSES CON MAYOR NÚMERO DE MUERTES POR SISMOS DE 1996 A 2015. FUENTE: CRED, 2016.	3
FIGURA 1.2. EDIFICIO COLAPSADO DURANTE EL TERREMOTO DE LORCA.....	5
FIGURA 2.1: ELEMENTOS PRINCIPALES EN LA ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA,.....	18
FIGURA 2.2. (A) VISTA DE MAPA DE UN EMPLAZAMIENTO ILUSTRATIVO, CON DOS FUENTES CERCANAS CAPACES DE PRODUCIR TERREMOTOS. (B) ESPECTROS DE RESPUESTA PREVISTOS DE LOS DOS EVENTOS SÍSMICOS, QUE ILUSTRAN QUE LOS EVENTOS QUE PRODUCEN LAS ACELERACIONES ESPECTRALES MÁXIMAS PUEDEN VARIAR DEPENDIENDO DEL PERÍODO DE INTERÉS (PREDICCIÓN OBTENIDA DEL MODELO DE CAMPBELL Y BOZORGNIA 2008). FUENTE: AN INTRODUCTION TO PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS (PSHA). BAKER, J. (2008)	21
FIGURA 2.3: FASES DEL CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO PROBABILISTA (MODIFICADO DE BENITO Y JIMÉNEZ,1999). FUENTE: PROYECTO EXPEL: SISTEMA EXPERTO DE ANÁLISIS PROBABILISTA DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA (2008)	23
FIGURA 2.4: EJEMPLOS DE DISTRIBUCIÓN DE PARES (MAGNITUD, DISTANCIA) QUE CONTRIBUYEN A LA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN UN PERIODO. FUENTE: DISAGGREGATION OF SEISMIC DRIFT HAZARD (BAKER ET AL.,2005).	29
FIGURA 2.5: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE EFECTOS DE FUENTE, CAMINO Y SITIO PARA EL BASAMENTO Y PARA UN PUNTO SITUADO SOBRE SEDIMENTOS. EL EFECTO DE SITIO SE PUEDE ESTIMAR COMO EL COCIENTE ESPECTRAL ENTRE LOS REGISTROS EN SEDIMENTO Y LOS REGISTROS EN ROCA: $SSITIO(\omega)=SSedimento(\omega) / SBASAMENTO(\omega)$. (GARCÍA-JEREZ, 2010).....	33
FIGURA 2.6. COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA OBTENIDAS POR EL MÉTODO CLÁSICO DE COEFICIENTE ESPECTRAL (EN ROJO) Y POR EL MÉTODO HVSR CON RUIDO AMBIENTAL (EN AZUL) EN DOS ESTACIONES DE CIUDAD DE LORCA. (NAVARRO, ET. AL, 2013).	34
FIGURA 2.7: INSTRUMENTACIÓN Y TRABAJO DE CAMPO PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO MASW EN CIUDAD DE LORCA, REALIZADO POR MARTÍNEZ-PAGÁN ET AL. (2014).	36
FIGURA 2.8. EJEMPLO DE ESTRUCTURA 2-D EN LA CIUDAD DE LORCA (CALLE GRANADA) OBTENIDA A PARTIR DEL MÉTODO MASW. A) DISTRIBUCIÓN DE VALORES VS30 A LOS LARGO DEL PERFIL; B) ESTRUCTURA 2-D DE VELOCIDAD VS (MARTINEZ_PAGÁN ET AL 2014).	36
FIGURA 2.9. EJEMPLOS DE CURVAS DE DISPERSIÓN DE ONDAS RAYLEIGH OBTENIDAS A TRAVÉS DEL MÉTODO SPAC EN LORCA (NAVARRO ET AL, 2014).	38
FIGURA 2.10. EJEMPLOS DE MODELOS DE VELOCIDAD DE CIZALLA OBTENIDOS EN LA CIUDAD DE LORCA A PARTIR DEL MÉTODO SPAC (NAVARRO ET AL, 2014).	38
FIGURA 2.11. CLASIFICACIÓN DEL TERRENO EN LA CIUDAD DE LORCA OBTENIDO A PARTIR DEL MÉTODO DEL GRADIENTE TOPOGRÁFICO EN LA CIUDAD DE LORCA (PREZ-CUEVAS, 2015).	39
FIGURA 2.12: ESTIMACIONES EMPÍRICAS DE LOS COEFICIENTES DE SITIO F_a Y F_v COMO UNA FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CIZALLADURA MEDIA PARA UN PICO DE ENTRADA DE ACELERACIONES DE TIERRA SOBRE ROCA IGUAL A APROXIMADAMENTE 0,1 g. FUENTE: FEMA-450.....	43
FIGURA 2.13: DIFERENCIACIÓN DE ESTRUCTURAS EN CLASES DE VULNERABILIDAD. TABLA DE VULNERABILIDAD. FUENTE: EMS-98.	48
FIGURA 2.14. GRÁFICO CON LAS PROBABILIDADES DE DISTINTO TIPO DE DAÑO QUE PUEDE ESPERARSE EN LAS CLASES DE VULNERABILIDAD A, SEGÚN LA EMS-98 Y MATRIS DE PROBABILIDAD DE DAÑO DE CHÁVEZ (1998), PARA DIFERENTES ACCIONES SÍSMICAS DADAS EN INTENSIDAD MACROSÍSMICA.....	51
FIGURA 2.15: DIAGRAMA DE FLUJO QUE REPRESENTA EL PROCESO SEGUIDO EN PROCEDIMIENTOS ESTÁTICOS NO LINEALES. FUENTE: FEMA-440	53
FIGURA 2.16. EJEMPLO DE CURVAS DE FRAGILIDAD Y DE LAS PROBABILIDADES DE DISTINTO GRADO DE DAÑO PARA UN TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA.	53
FIGURA 3.1. ESQUEMA DE LAS DIVERSAS FASES QUE COMPONEN EL ESTUDIO COMPLETO DE RIESGO SÍSMICO A ESCALA URBANA.	59
FIGURA 3.2. MARCO TECTÓNICO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA. SE MUESTRAN LAS PRINCIPALES FALLAS Y CUENCAS. LAS FLECHAS ROJAS INDICAN LA DIRECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO DE LA CUENCA DE ALBORÁN. LOS COLORES REPRESENTAN: 1) CORTEZA OCEÁNICA; 2) BLOQUES LEVANTADOS EN CORTEZA CONTINENTAL; 3) PLATAFORMA CONTINENTAL. 4) CUENCAS EN LA PLATAFORMA. 5) PIRINEOS (VERGENCIA N) 6) PIRINEOS (VERGENCIA S). 7) BLOQUES LEVANTADOS EN CORTEZA CONTINENTAL. 8) CUENCAS EN CORTEZA CONTINENTAL. 9) DOMINIO DE ALBORÁN. 10) ABANICO DEL GOLFO	

DE CÁDIZ. 11) CORTEZA CONTINENTAL EUROASIÁTICA. 12) CORTEZA CONTINENTAL AFRICANA. (DeVICENTE ET AL., 2011).	62
FIGURA 3.3. MAPA DE FALLAS DEL QAFI V.3 EN LA PENÍNSULA IBÉRICA	63
FIGURA 3.4. ZONIFICACIONES SÍSMICAS PROPUESTAS POR DIFERENTES AUTORES PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA. A) MARTÍN (1983) B) IPEEE (1993), C) MOLINA (1998) Y D) NCSE-02 (2002).	66
FIGURA 3.5. ZONIFICACIÓN DE GARCÍA-MAYORDOMO (2010) (A LA IZQ.) Y (2012) (A LA DER.)	67
FIGURA 3.6. CORRELACIONES ENTRE ESCALAS DE TAMAÑO OBTENIDAS EN EL PROYECTO PARA LA REALIZACIÓN DEL NUEVO MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DE ESPAÑA E HISTOGRAMAS DE LAS DIFERENCIAS (MW- MBX) PARA CADA UNA DE LAS MAGNITUDES. FUENTE: PROYECTO OPPEL (IGN-UPM, 2012).	70
FIGURA 3.7. CORRELACIONES ENTRE ESCALAS DE TAMAÑO OBTENIDAS EN EL PROYECTO PARA LA REALIZACIÓN DEL NUEVO MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DE ESPAÑA E HISTOGRAMAS DE LAS DIFERENCIAS (MW- MBX) PARA CADA UNA DE LAS MAGNITUDES. FUENTE: PROYECTO OPPEL (IGN-UPM, 2012).	71
FIGURA 3.8. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE COMPLETITUD	74
FIGURA 3.9. EJEMPLO DE AJUSTE CON EL MODELO DE RECURRENCIA DE GUTENBERG-RICHTER, APLICANDO SIMULACIONES DE MONTECARLO. LAS LÍNEAS EN TONOS DE GRISES, REPRESENTAN LOS DISTINTOS AJUSTES OBTENIDOS DE LAS SIMULACIONES, LA LÍNEA NEGRA CONTINUA REPRESENTA LA MEDIA DE LOS AJUSTES Y LAS LÍNEAS DISCONTINUAS LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MEDIA $\pm \sigma$).	78
FIGURA 3.10. ESQUEMA DE DEFINICIÓN DE LAS MAGNITUDES MÁXIMAS DE LAS ZONAS PARA EL MÉTODO ZONIFICADO.	79
FIGURA 3.11. REPARTO DE POTENCIAL SÍSMICO DE UNA REGIÓN EN DIFERENTES FUENTES.	80
FIGURA 3.12. ESQUEMA DE UN ANÁLISIS DE COMPLETITUD, DONDE SE OBSERVAN LOS RANGOS DE MAGNITUD QUE HAN SIDO REGISTRADOS COMPLETAMENTE. EJE IZQ: AÑO DE REFERENCIA PARA CADA RANGO DE MAGNITUD, IZQ. ARRIBA: AOC = AÑO ORIGEN DEL CATÁLOGO, IZQ. ABAJO: AÑO ACTUAL; EJE DER.: PERIODO DE COMPLETITUD PARA CADA RANGO DE MAGNITUD (PC(M)), DER. ARRIBA: POC = PERIODO DE OBSERVACIÓN DEL CATÁLOGO.	81
FIGURA 3.13. TASA DE MOMENTO SÍSMICO TOTAL DE LA FALLA	82
FIGURA 3.14. ESQUEMA GENERAL DE UN ÁRBOL LÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA.	90
FIGURA 3.15. EJEMPLO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA INCLUYENDO EL EFECTO LOCAL. A) (ARRIBA IZQ.) MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN UN EMPLAZAMIENTO GENÉRICO EN ROCA, B) (ABAJO IZQ.) MAPA DE AMPLIFICACIÓN DEL TERRENO EN FUNCIÓN DEL PERIODO Y DEL MOVIMIENTO DE ENTRADA. B) (DER.) MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA INCLUYENDO EL EFECTO DE SITIO.	99
FIGURA 3.16. ESQUEMA DE MÉTODO ESTOCÁSTICO DE MONTECARLO APLICADO A LA ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD DEL PARQUE INMOBILIARIO EN UN ESTUDIO DE RIESGO SÍSMICO.	110
FIGURA 3.17. ESQUEMA DE LAS FASES DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS INDICADORES DEL RIESGO SÍSMICO.	112
FIGURA 3.18. ESQUEMA DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD – DEMANDA Y FRAGILIDAD PARA ESTIMAR EL DAÑO EN EDIFICACIONES	114
FIGURA 3.19. DUCTILIDAD (ARRIBA) Y PERIODO (ABAJO) DE ALGUNAS TIPOLOGÍAS DE ESPAÑA, SEGÚN LOS ESPECTROS DE CAPACIDAD PROPORCIONADOS POR HAZUS-MH, RISK-UE Y LAGOMARSINO Y GIOVINAZZI.	117
FIGURA 3.20. ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN-DESPLAZAMIENTO MODIFICADO (MADRS) PARA USO CON PERIODO SECANTE, TSEC. FUENTE: FEMA-440	120
FIGURA 3.21. DEMANDA INICIAL DE ADRS Y ESPECTRO DE CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA. FUENTE: FEMA-440	123
FIGURA 3.22. REPRESENTACIÓN BILINEAL DE LA CURVA DE CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA. FUENTE: FEMA-440	123
FIGURA 3.23. DETERMINACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO ESTIMADO MEDIANTE LA INTERSECCIÓN DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD CON MADRS. FUENTE: FEMA-440	125
FIGURA 3.24. OCUPACIÓN DE LOS EDIFICIOS EN FUNCIÓN DE LA HORA DEL DÍA. (DE COBURN Y SPENCE, 2002).	130
FIGURA 4.1. MAPA DE REGIÓN DE ESTUDIO, CORDILLERA BÉTICA, CON LA BATIMETRÍA, EL LÍMITE ENTRE PLACAS (USGS) Y LAS FALLAS ACTIVAS (QAFI).	140
FIGURA 4.2. MAPA DE SISMOS CON INTENSIDAD MAYOR O IGUAL QUE VIII DE LA ÉPOCA PRE-INSTRUMENTAL (ANTES DE 1923) Y SISMOS CON MAGNITUD MAYOR A MW A 5 (DESPUÉS DE 1923), OCURRIDOS EN LA ÉPOCA INSTRUMENTAL, EN LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA CIUDAD DE LORCA.	141
FIGURA 4.3. ARRIBA: A) MAPA CON LA UBICACIÓN DE LAS TRAZAS DE FALLAS DE LA BASE DE DATOS DEL QAFIMUR (2013) Y QAFIV.3 (2015) DENTRO DE LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA CIUDAD DE LORCA. ABAJO: B) MAPA CON LAS TRAZAS DE FALLAS CONSIDERADAS FINALMENTE PARA EL CÁLCULO DE PELIGROSIDAD.	146
FIGURA 4.4. ZONAS IDENTIFICADAS POR GARCÍA-MAYORDOMO (2010), EN EL ENTORNO DE LA ZONA DE INFLUENCIA DE LORCA.	147
FIGURA 4.5. ZONAS IDENTIFICADAS POR GARCÍA-MAYORDOMO (2012), EN EL ENTORNO DE LA ZONA DE INFLUENCIA DE LORCA.	148
FIGURA 4.6. CATÁLOGO DE PARTIDA ACTUALIZADO AL AÑO 2016, CON SISMOS DE MW ≥ 3.5 .	151
FIGURA 4.7. DISTRIBUCIÓN DE SISMOS PRINCIPALES CON MAGNITUD MAYOR O IGUAL A MW3.5. RESULTANTES DEL PROCESO	

DE PURACIÓN	153
FIGURA 4.8. MAPA DEL CATÁLOGO FINAL DE PROYECTO PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA CIUDAD DE LORCA.	155
FIGURA 4.9. NÚMERO DE SISMOS POR MAGNITUD MW, INCLUIDOS EN EL CATÁLOGO FINAL DE ESTUDIO.	156
FIGURA 4.10. SUPERPOSICIÓN DEL CATÁLOGO DE PROYECTO CON LAS ZONAS SISMOGÉNICAS DE GM12 CONTENIDAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA CIUDAD DE LORCA.	157
FIGURA 4.11. SUPERPOSICIÓN DEL CATÁLOGO DE PROYECTO CON LAS ZONAS SISMOGÉNICAS DE GM10 CONTENIDAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE CIUDAD DE LORCA.....	159
FIGURA 4.12. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y CARACTERÍSTICAS DE LA FALLA.....	160
FIGURA 4.13. SUPERPOSICIÓN DE LAS FALLAS Y SEGMENTOS DE FALLAS CONSIDERADAS PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MHZF, CON LAS REGIONES DE GM10.	161
FIGURA 4.14. NÚMERO DE FALLAS CONTENIDAS DENTRO DE CADA REGIÓN.....	161
FIGURA 4.15. REPARTO DE LA TASA DE MOMENTO SÍSMICO DE LA FALLA, EN LOS INTERVALOS DE MAGNITUD CONOCIDOS..	164
FIGURA 4.16. CLASES OBTENIDAS PARA CADA MODELO DE ATENUACIÓN SEGÚN EL MÉTODO SHERBAUM (2004) PARA PGA.	172
FIGURA 4.17. DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE LOS INDICADORES MDE, K Y EDR PARA LOS CINCO MODELOS DE ATENUACIÓN CALIBRADOS CON EL MÉTODO DE KALE Y AKKAR (2012) PARA PGA, Sa(0.1s) Y Sa(1.0s).	173
FIGURA 4.18. PERFIL GEOLÓGICO DEDUCIDO DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA A ESCALA 1:10.000, DATOS GEOTÉCNICOS, SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES, PERFILES SÍSMICOS DE REFRACCIÓN Y ENSAYOS SPAC JUNTO A LOS CON LOS MODELOS DE VS (M S-1) OBTENIDOS MEDIANTE ENSAYOS SPAC EN CIUDAD DE LORCA. FUENTE: ALCALA ET.AL, 2012.	176
FIGURA 4.19. SITIOS DE LA CIUDAD DE LORCA DONDE SE REALIZARON LOS ESTUDIOS DE SPAC (IZQ.) Y DE MASW (DER.). FUENTE: NAVARRO ET. AL (2013) Y MARTINEZ-PAGAN (2013).	177
FIGURA 4.20. MAPA DE VELOCIDADES DE Vs30 EN CIUDAD DE LORCA Y SU CORRESPONDIENTE CLASE DE SUELO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DEL NEHRP (2009).	179
FIGURA 4.21. MALLA DE CÁLCULO PARA EL QUE EFECTUARÁ EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD	180
FIGURA 4.22. ÁRBOL LÓGICO GENERADO PARA EL CÁLCULO DE PELIGROSIDAD PROBABILISTA (PSHA).....	182
FIGURA 4.23. RESULTADOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN TÉRMINOS DE ACELERACIONES PGA (g), PARA EL CÁLCULO REALIZADO CON EL MÉTODO HÍBRO DE ZONAS Y FALLAS (MHZF) Y TASAS DE DESLIZAMIENTO MEDIDAS CON TÉCNICAS GEODÉSICAS, SEGÚN LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE A) ABRAHAMSON Y SILVA (2013), B) CAMPBELL Y BOZORGNIA (2013) Y C) AKKAR Y BOMMER (2010) – RUIZ (2012).	186
FIGURA 4.24. RESULTADOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN TÉRMINOS DE ACELERACIONES PGA (g), PARA EL CÁLCULO REALIZADO CON EL MÉTODO HÍBRO DE ZONAS Y FALLAS (MHZF) Y TASAS DE DESLIZAMIENTO DEL QAFI (PALEOSISMICIDAD), SEGÚN LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE A) ABRAHAMSON Y SILVA (2013), B) CAMPBELL Y BOZORGNIA (2013) Y C) AKKAR Y BOMMER (2010) – RUIZ (2012).	187
FIGURA 4.25. RESULTADOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN TÉRMINOS DE ACELERACIONES PGA (g), PARA EL CÁLCULO REALIZADO CON EL MÉTODO CLÁSICO ZONIFICADO (MCZ), SEGÚN LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE A) ABRAHAMSON Y SILVA (2013), B) CAMPBELL Y BOZORGNIA (2013) Y C) AKKAR Y BOMMER (2010) – RUIZ (2012).	188
FIGURA 4.26. ARRIBA: MAPA COMPARATIVO MOSTRANDO LA RAZÓN DE LAS ACELERACIONES PGA OBTENIDAS SEGÚN EL MÉTODO MHZF, APLICADO CON LAS TASAS DE DESLIZAMIENTO MEDIDAS CON TÉCNICAS GEODÉSICAS, ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MISMO MÉTODO APLICADO CON TASAS DE DESLIZAMIENTO DEL QAFI (PALEOSISMICIDAD). ABAJO: MAPA COMPARATIVO MOSTRANDO LA RAZÓN DE LAS ACELERACIONES PGA OBTENIDAS SEGÚN EL MÉTODO MHZF ENTRE LAS OBTENIDAS CON EL MÉTODO MCZ.	189
FIGURA 4.27. MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN TÉRMINOS DE PGA (g) EN ROCA, PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA) Y 975 AÑOS (ABAJO).	191
FIGURA 4.28. MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA PARA Sa(0.1 s) (g) EN ROCA, PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA) Y 975 AÑOS (ABAJO).	192
FIGURA 4.29. MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA PARA Sa(1s) (g) EN ROCA, PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA) Y 975 AÑOS (ABAJO).	193
FIGURA 4.30. MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN TÉRMINOS DE PGA (g) EN INCLUYENDO EL EFECTO LOCAL, PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA) Y 975 AÑOS (ABAJO).	195
FIGURA 4.31. MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN TÉRMINOS DE Sa(0.1s) (g) INCLUYENDO EL EFECTO LOCAL, PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA) Y 975 AÑOS (ABAJO).	196
FIGURA 4.32. MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN TÉRMINOS DE Sa(1s) (g) INCLUYENDO EL EFECTO LOCAL, PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA) Y 975 AÑOS (ABAJO).	197
FIGURA 4.33. ESPECTROS DE RESPUESTA ESTIMADOS EN DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA CON CLASE DE SUELO B (SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL NEHRP, SUELO I SEGÚN LA NSCE-02), PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS, Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA NORMA NSCE-02 PARA EL MISMO TIPO DE SUELO.	198

FIGURA 4.34. ESPECTROS DE RESPUESTA ESTIMADOS EN DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA CON CLASE DE SUELO C (SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL NEHRP, SUELO II SEGÚN LA NSCE-02), PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS, Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA NORMA NSCE-02 PARA EL MISMO TIPO DE SUELO.	199
FIGURA 4.35. ESPECTROS DE RESPUESTA ESTIMADOS EN DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA CON CLASE DE SUELO D (SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL NEHRP, SUELO III SEGÚN LA NSCE-02), PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS, Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA NORMA NSCE-02 PARA EL MISMO TIPO DE SUELO.	199
FIGURA 4.36. ESPECTRO DE RESPUESTA ESTIMADO EN EL BARRIO DE SAN FERNANDO DE CIUDAD DE LORCA, CON CLASE DE SUELO E (SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL NEHRP, SUELO IV SEGÚN LA NSCE-02), PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS, Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA NORMA NSCE-02 PARA EL MISMO TIPO DE SUELO.....	200
FIGURA 4.37. ESPECTROS DE RESPUESTA ESTIMADOS EN DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA CON CLASE DE SUELO B (SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL NEHRP, SUELO I SEGÚN LA NSCE-02), PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 975 AÑOS, Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA NORMA NSCE-02 PARA EL MISMO TIPO DE SUELO.	201
FIGURA 4.38. ESPECTROS DE RESPUESTA ESTIMADOS EN DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA CON CLASE DE SUELO C (SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL NEHRP, SUELO II SEGÚN LA NSCE-02), PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 975 AÑOS, Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA NORMA NSCE-02 PARA EL MISMO TIPO DE SUELO.	201
FIGURA 4.39. ESPECTROS DE RESPUESTA ESTIMADOS EN DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA CON CLASE DE SUELO D (SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL NEHRP, SUELO III SEGÚN LA NSCE-02), PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 975 AÑOS, Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA NORMA NSCE-02 PARA EL MISMO TIPO DE SUELO.	202
FIGURA 4.40. ESPECTRO DE RESPUESTA ESTIMADO EN EL BARRIO DE SAN FERNANDO DE CIUDAD DE LORCA, CON CLASE DE SUELO E (SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL NEHRP, SUELO IV SEGÚN LA NSCE-02), PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 975 AÑOS, Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA NORMA NSCE-02 PARA EL MISMO TIPO DE SUELO.....	202
FIGURA 4.41. RESULTADO DE DESAGREGACIÓN DEL CÁLCULO PROBABILISTA PARA EL MOVIMIENTO OBJETO DADO POR LA PGA EN UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA IZQ.), DE 975 AÑOS (ABAJO IZQ.), Y PARA SA(1s) EN 475 AÑOS (ARRIBA DER.) Y 975 AÑOS (ABAJO DER.) SEGÚN LA RAMA DE PELIGROSIDAD CALCULADA CON EL MÉTODO MHZF, TASAS DE DESLIZAMIENTO GEODÉSICOS Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ASK13..	204
FIGURA 4.42. RESULTADO DE DESAGREGACIÓN DEL CÁLCULO PROBABILISTA PARA EL MOVIMIENTO OBJETO DADO POR LA PGA EN UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA IZQ.), DE 975 AÑOS (ABAJO IZQ.), Y PARA SA(1s) EN 475 AÑOS (ARRIBA DER.) Y 975 AÑOS (ABAJO DER.) SEGÚN LA RAMA DE PELIGROSIDAD CALCULADA CON EL MÉTODO MHZF, TASAS DE DESLIZAMIENTO DEL QAFI (PALEOSISMICIDAD) Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ASK13.	205
FIGURA 4.43. RESULTADO DE DESAGREGACIÓN DEL CÁLCULO PROBABILISTA PARA EL MOVIMIENTO OBJETO DADO POR LA PGA EN UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (ARRIBA IZQ.), DE 955 AÑOS (ABAJO IZQ.), Y PARA SA(1s) EN 475 AÑOS (ARRIBA DER.) Y 975 AÑOS (ABAJO DER.) SEGÚN LA RAMA DE PELIGROSIDAD CALCULADA CON EL MÉTODO MCZ Y EL MODELO DE ATENUACIÓN ASK13.	206
FIGURA 4.44. ESCENARIOS SÍSMICOS DEFINIDOS DE ACUERDO A LOS SISMOS DE CONTROL OBTENIDOS DE LA DESAGREGACIÓN Y LAS FALLAS A LAS QUE HAN SIDO ASOCIADOS. EL CÍRCULO PUNTEADO EN VERDE INDICA EL RADIO DE 10 KM DEL CENTRO DE LA CIUDAD DE LORCA, DENTRO DEL CUAL SE UBICA EL SISMO MÁS PROBABLE QUE DEFINE EL PRIMER ESCENARIO, MW5.2. EL CÍRCULO PUNTEADO EN AZUL, INDICA EL RADIO DE 10 A 20 KM DE LA CIUDAD, DENTRO DEL CUAL SE UBICARÁ EL SISMO EXTREMO, ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 975 AÑOS, Mw 6.5.....	207
FIGURA 5.1. CÁLCULO DE LA POSICIÓN RELATIVA DEL PLANO DE RUPTURA DE LA FALLA CON RESPECTO AL PUNTO MEDIO DE LA TRAZA ESTABLECIDO Y LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA FALLA.	213
FIGURA 5.2. VISTA EN PLANTA DE LA LOCALIZACIÓN DEL PLANO DE RUPTURA GENERADO CON RESPECTO A LA CIUDAD DE LORCA (EN VERDE).	214
FIGURA 5.3. ESPECTROS OBTENIDOS EN LOS BARRIOS CON CLASE DE SUELO B DE CIUDAD DE LORCA, SEGÚN EL MODELO DE A) ASK13, B) CB13, C) CY13 Y D) MP12.....	216
FIGURA 5.4. ESPECTROS OBTENIDOS EN LOS BARRIOS CON CLASE DE SUELO C DE CIUDAD DE LORCA, SEGÚN EL MODELO DE A) ASK13, B) CB13, C) CY13 Y D) MP12.....	217
FIGURA 5.5. ESPECTROS OBTENIDOS EN LOS BARRIOS CON CLASE DE SUELO D DE CIUDAD DE LORCA, SEGÚN EL MODELO DE A) ASK13, B) CB13, C) CY13 Y D) MP12.....	217
FIGURA 5.6. ESPECTRO OBTENIDO EN LA CLASE DE SUELO E DE CIUDAD DE LORCA, SEGÚN EL MODELO DE A) ASK13, B) CB13, C) CY13 Y D) MP12.	218
FIGURA 5.7. NÚMERO DE EDIFICIOS (ARRIBA) Y DE VIVIENDAS (ABAJO) POR AÑO DE CONSTRUCCIÓN, SEGÚN DATOS CATASTRALES PARA LA CIUDAD DE LORCA.	220
LA FIGURA 5.8. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE EDIFICIOS, SEGÚN SU AÑO DE CONSTRUCCIÓN, EN CIUDAD DE LORCA. LOS CUADROS DE ZOOM A Y ZOOM B CON UNA VISTA MÁS AMPLIA DE ESTAS ZONAS SE MUESTRA EN LA SIGUIENTE FIGURA.	221
FIGURA 5.9. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE EDIFICIOS, SEGÚN SU AÑO DE CONSTRUCCIÓN, EN LOS BARRIOS DE SAN CRISTÓBAL (ARRIBA), Y EN LOS BARRIOS DEL CASCO HISTÓRICO Y ALEDAÑOS (PARROQUIAS ALTAS, SANTIAGO Y SAN MATEO)...222	222

FIGURA 5.10. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE EDIFICIOS, SEGÚN SU ALTURA, EN CIUDAD DE LORCA.....	223
FIGURA 5.11. ESTRUCTURA MURARIA DE ESCOMBROS DE PIEDRA IDENTIFICADA EN EL NÚCLEO URBANO DE LORCA.....	224
FIGURA 5.12. ESTRUCTURA MURARIA SIN REFORZAR, CON FORJADOS DE MADERA, UBICADA EN LA CIUDAD DE LORCA.....	225
FIGURA 5.13. ESTRUCTURA MURARIA DE FÁBRICA DE LADRILLO SIN REFORZAR, CON FORJADOS DE HORMIGÓN, UBICADA EN LA CIUDAD DE LORCA.	226
FIGURA 5.14. ESTRUCTURA DE PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO CON PAREDES DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR, LOCALIZADA EN LA CIUDAD DE LORCA.	227
FIGURA 5.15. DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LORCA POR AÑO DE CONSTRUCCIÓN, SEGÚN LA MATRIZ DE TRANSFERENCIA ADOPTADA.....	229
FIGURA 5.16. DISTRIBUCIÓN DE VULNERABILIDAD DEL TOTAL DEL PARQUE INMOBILIARIO DE LA CIUDAD DE LORCA.....	229
FIGURA 5.17. NÚMERO DE EDIFICIOS TRADICIONALES (MAMPOSTERÍA) Y TECNOLÓGICOS (HORMIGÓN ARMADO), POR AÑO DE CONSTRUCCIÓN, EXISTENTES EN LA CIUDAD DE LORCA.	230
FIGURA 5.18. ARRIBA: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN CIUDAD DE LORCA, DIVIDIDAS SEGÚN SU TIPO DE ESTRUCTURA PRINCIPAL (MAMPOSTERÍA U HORMIGÓN ARMADO) Y NÚMERO TOTAL DE EDIFICIOS EN CADA BARRIO. ABAJO: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN CIUDAD DE LORCA, DIVIDIDAS SEGÚN SU TIPO DE ESTRUCTURA PRINCIPAL (MAMPOSTERÍA U HORMIGÓN ARMADO) Y NÚMERO TOTAL DE VIVIENDAS EN CADA BARRIO.	231
FIGURA 5.19. NÚMERO DE HABITANTES EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA.....	232
FIGURA 5.20. DENSIDAD DE HABITANTES POR VIVIENDA Y NÚMERO DE VIVIENDAS EN CADA BARRIO DE LA CIUDAD DE LORCA.	232
FIGURA 5.21. ÁRBOL LÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL DAÑO EN LOS EDIFICIOS, IMPLEMENTANDO EL MÉTODO DE MONTECARLO PARA LA ASIGNACIÓN DE LA VULNERABILIDAD.	234
FIGURA 5.22. ESPECTROS DE CAPACIDAD UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DEL PUNTO DE DESEMPEÑO DE LOS EDIFICIOS.	235
FIGURA 5.23. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LAS TIPOLOGÍAS M31L Y RC31M-PRE.....	237
FIGURA 5.24. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE DAÑO EN LOS EDIFICIOS, EN BASE AL NÚMERO DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑO, SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE GRADOS DE DAÑO DE RISK-UE: NULO, LIGERO, MODERADO, EXTENSO Y COMPLETO, EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA, PARA EL SISMO DE Mw5.2.....	240
FIGURA 5.25. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS CON DIFERENTES GRADOS DE DAÑO (ARRIBA) Y DEL ÍNDICE DE DAÑO MEDIO (ABAJO) EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA, PARA EL SISMO DE Mw5.2.	241
FIGURA 5.26. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS INHABITABLES (ARRIBA) Y PERSONAS QUE RESULTARÍAN SIN HOGAR (ABAJO) PARA EL SISMO DE Mw5.2, EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA.	243
FIGURA 5.27. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VÍCTIMAS MORTALES (ARRIBA) Y HERIDOS DE DIFERENTES GRADOS: CON CARÁCTER DE URGENCIA, QUE NECESITAN ATENCIÓN MÉDICA Y HERIDOS LEVES, JUNTO AL NÚMERO TOTAL DE HERIDOS (ABAJO), EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA.....	246
FIGURA 5.28. COSTES DEL TERREMOTO DE LORCA. FUENTE: DELEGACIÓN DEL GOBIERNO EN LA REGIÓN DE MURCIA (AL AÑO 2012).	247
FIGURA 5.29. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS ASOCIADAS AL ESCENARIO DEL SISMO DE Mw5.2. ARRIBA: COSTES TOTALES POR BARRIO. ABAJO: COSTES DE RECONSTRUCCIÓN (EN MILLONES DE EUROS); ABAJO: COSTES DE REPARACIÓN TOTALES, Y SEGÚN EL TIPO DE REPARACIÓN: LIGERA, MODERADA Y EXTENSA.....	250
FIGURA 6.1. VISTA EN SUPERFICIE DE LA MODELIZACIÓN DE LOS PLANOS DE RUPTURA ESTIMADOS POR LÓPEZ-COMINO, 2012 (EN AMARILLO), MARTÍNEZ-DÍAZ, 2012 (EN VERDE), SANTOYO, 2012 (EN NARANJA) Y EL IGN (EN AZUL). ARRIBA: VISTA COMPLETA DE LA FALLA DE ALHAMA DE MURCIA Y DE LOS PLANOS DE RUPTURA. ABAJO: VISTA ZOOM A LOS PLANOS DE RUPTURA.	256
FIGURA 6.2. VISTA ISOMÉTRICA DE LOS PLANOS DE RUPTURA MODELIZADOS Y EL PLANO DE FALLA DE ALHAMA DE MURCIA, EN SU SEGMENTO LORCA-TOTANA, CON RESPECTO A LA SUPERFICIE DEL TERRENO.....	257
FIGURA 6.3. LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES DEL IGN QUE REGISTRARON EL TERREMOTO DE LORCA DEL 11 DE MAYO DE 2011.	258
FIGURA 6.4. ACELERACIONES MEDIAS, μ , Y $\mu \pm \sigma$ OBTENIDAS POR LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE A) ABRAHAMSON ET AL., 2013, B) CAMPBELL Y BOZORGNIA, 2013 Y C) CHIOU Y YOUNGS, 2013 PARA LA SIMULACIÓN DEL SISMO DE Mw 5.2 CON EL MODELO DE FUENTE DE MARTÍNEZ-DÍAZ, 2012, Y LA PGA REGISTRADA EN LAS ESTACIONES DEL IGN. .	262
FIGURA 6.5. ESPECTROS DE RESPUESTA OBTENIDOS CON LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE A) ARRIBA IZQ.: ABRAHAMSON ET AL., 2013, B) ARRIBA DER.: CAMPBELL Y BOZORGNIA, 2013 Y C) ABAJO IZQ.: CHIOU Y YOUNGS, 2013 Y D) ABAJO DER.: RUIZ ET AL., 2012 PARA LA SIMULACIÓN DEL SISMO DE Mw5.2 Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DEL TERREMOTO DE LORCA DEL 11 DE MAYO DE 2011 (EN AMARILLO).	262
FIGURA 6.6. MAPAS DE ACELERACIONES PGA MEDIAS OBTENIDAS CON LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE A) ARRIBA IZQ.: ABRAHAMSON ET AL., 2013, B) ARRIBA DER.: CAMPBELL Y BOZORGNIA, 2013 Y C) ABAJO IZQ.: CHIOU Y YOUNGS, 2013 Y D) ABAJO DER.: RUIZ ET AL., 2012 PARA LA SIMULACIÓN DEL SISMO DE Mw5.2.	264

FIGURA 6.7. RESULTADOS DE NÚMERO DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE 85% MAMPOSTERÍA Y 15% HORMIGÓN ARMADO EN MEDIA/MÁXIMO/MÍNIMO PARA LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON UN TAMAÑO DE MUESTRA DE A) ARRIBA IZQ.: 100 EDIFICIOS, B) ARRIBA DER.: 1000 EDIFICIOS, C) ABAJO IZQ.: 2000 EDIFICIOS Y D) ABAJO DER.: 3000 EDIFICIOS.	268
FIGURA 6.8. RESULTADOS DE NÚMERO DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE 50% MAMPOSTERÍA Y 50% HORMIGÓN ARMADO EN MEDIA/MÁXIMO/MÍNIMO PARA LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON UN TAMAÑO DE MUESTRA DE A) ARRIBA IZQ.: 100 EDIFICIOS, B) ARRIBA DER.: 1000 EDIFICIOS, C) ABAJO IZQ.: 2000 EDIFICIOS Y D) ABAJO DER.: 3000 EDIFICIOS.	269
FIGURA 6.9. RESULTADOS DE NÚMERO DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE 15% MAMPOSTERÍA Y 85% HORMIGÓN ARMADO EN MEDIA/MÁXIMO/MÍNIMO PARA LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON UN TAMAÑO DE MUESTRA DE A) ARRIBA IZQ.: 100 EDIFICIOS, B) ARRIBA DER.: 1000 EDIFICIOS, C) ABAJO IZQ.: 2000 EDIFICIOS Y D) ABAJO DER.: 3000 EDIFICIOS.	270
FIGURA 6.10. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DE NORMALIDAD POR TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE 85% MAMPOSTERÍA Y 15% HORMIGÓN ARMADO PARA LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON UN TAMAÑO DE MUESTRA DE A) ARRIBA IZQ.: 100 EDIFICIOS, B) ARRIBA DER.: 1000 EDIFICIOS, C) ABAJO IZQ.: 2000 EDIFICIOS Y D) ABAJO DER.: 3000 EDIFICIOS.	272
FIGURA 6.11. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DE NORMALIDAD POR TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE 50% MAMPOSTERÍA Y 50% HORMIGÓN ARMADO PARA LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON UN TAMAÑO DE MUESTRA DE A) ARRIBA IZQ.: 100 EDIFICIOS, B) ARRIBA DER.: 1000 EDIFICIOS, C) ABAJO IZQ.: 2000 EDIFICIOS Y D) ABAJO DER.: 3000 EDIFICIOS.	273
FIGURA 6.12. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DE NORMALIDAD POR TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE 15% MAMPOSTERÍA Y 85% HORMIGÓN ARMADO PARA CADA TIPOLOGÍA DE DAÑO PARA LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON UN TAMAÑO DE MUESTRA DE A) ARRIBA IZQ.: 100 EDIFICIOS, B) ARRIBA DER.: 1000 EDIFICIOS Y C) ABAJO IZQ.: 2000 EDIFICIOS.	274
FIGURA 6.13. GRÁFICO P-P PLOT PARA BONDAD DE AJUSTE DE NORMALIDAD DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE 15% MAMPOSTERÍA Y 85% HORMIGÓN ARMADO, PARA EDIFICIOS CON DAÑO EXTENSO, OBTENIDO DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON UN TAMAÑO DE MUESTRA DE 2000 EDIFICIOS.	276
FIGURA 6.14. HISTOGRAMA PARA BONDAD DE AJUSTE DE NORMALIDAD PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE 50% MAMPOSTERÍA Y 50% HORMIGÓN ARMADO PARA EDIFICIOS CON DAÑO COMPLETO, PARA LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON UN TAMAÑO DE MUESTRA DE 1000 EDIFICIOS.	276
FIGURA 6.15. RANGO DE CONFIANZA (95% Y 99%) Y MEDIA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EDIFICIOS PARA LAS DISTRIBUCIONES DE TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVAS CON RESULTADOS DE DAÑO COMPLETO.	284
FIGURA 6.16: RANGO DE CONFIANZA (95% Y 99%) Y MEDIA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EDIFICIOS PARA LAS DISTRIBUCIONES DE TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVAS CON RESULTADOS DE DAÑO MODERADO Y DAÑO EXTENSO.	285
FIGURA 6.17. RANGO DE CONFIANZA (95% Y 99%) Y MEDIA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EDIFICIOS PARA LAS DISTRIBUCIONES DE TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVAS CON RESULTADOS DE DAÑO LEVE Y SIN DAÑOS.	286
FIGURA 6.18. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DE NORMALIDAD MEDIANTE EL TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DE LA ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD PARA EL PARQUE INMOBILIARIO DE LORCA CONSIDERANDO DISTINTOS MODELOS DE ATENUACIÓN Y MÉTODOS CAPACIDAD-DEMANDA.	288
FIGURA 6.19. INTERFAZ GRÁFICA DE ENTRADA AL PROGRAMA DAMMUM, EN LA CUAL SE ELIGE EL MÉTODO ANALÍTICO A UTILIZAR PARA LA ESTIMACIÓN DE DAÑOS.	291
FIGURA 6.20. VENTANA DEL PROGRAMA DAMMUM CON LOS BOTONES PARA CARGAR LA BASE DE DATOS, SELECCIONAR LOS ESPECTROS DE CAPACIDAD Y CURVAS DE FRAGILIDAD, Y LOS BOTONES PARA DAR INICIO AL CÁLCULO, EXPORTAR LOS RESULTADOS A EXCEL O COPIARLOS A OTRO FICHERO.	292
FIGURA 6.21. VENTANA PARA SELECCIONAR LOS ESPECTROS DE CAPACIDAD DE LAS METODOLOGÍAS RISK-UE, HAZUS O L&G(2006), CONTENIDAS POR DEFECTO EN EL PROGRAMA, O CARGAR OTROS VALORES DE ESPECTROS A TRAVÉS DE LA PESTAÑA "OTHER CAPACITY SPECTRUMS".	292
FIGURA 6.22. RESULTADOS DE NÚMEROS DE EDIFICIOS CON DIFERENTES GRADOS DE DAÑOS SEGÚN EL MÉTODO I-DCM (ARRIBA) Y EL MÉTODO MADRS (ABAJO), SEGÚN LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE ABRAHAMSON ET AL. (2013), CAMPBELL Y BOZORGNI (2013), CHIOU Y YOUNGS (2013), EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN DEL SISMO DE LORCA DE 2011.	294
FIGURA 6.23. RESULTADOS DE DAÑO (% DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑO) CON LOS DIFERENTES MODELOS DE ATENUACIÓN EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN, PARA LAS ACELERACIONES MEDIAS Y $\pm$ SIGMA DE CADA MODELO, CON EL MÉTODO I-DCM (ARRIBA) Y MADRS (ABAJO).	295
FIGURA 6.24. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DAÑO EN EDIFICIOS SEGÚN EL MÉTODO I-DCM Y EL MÉTODO MADRS, COMBINANDO LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ATENUACIÓN EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN DE MANERA EQUITATIVA.	296

FIGURA 6.25. FICHA TÉCNICA UTILIZADA POR LOS ARQUITECTOS E INGENIEROS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS EDIFICIOS Y TRIAJE DE COLOR REALIZADO TRAS EL TERREMOTO DE LORCA DE 2011.....	298
FIGURA 6.26. MAPA CON LA UBICACIÓN DE LOS EDIFICIOS EVALUADOS EN LA VISITA A CAMPO, EN LOS BARRIOS DE LA VIÑA, SAN JOSÉ, SANTIAGO, PARROQUIAS ALTAS Y SAN CRISTÓBAL.	301
FIGURA 6.27. FICHA UTILIZADA PARA LA EVALUACIÓN DE EDIFICACIONES Y SUS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA VISITA A CAMPO REALIZADA A LA CIUDAD DE LORCA.	302
FIGURA 6.28. RESULTADOS DE GRADOS DE DAÑO EN EDIFICIOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISMO MW5.2 MEDIANTE LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE ABRAHAMSON ET AL. (2013), CAMPBELL Y BOZORGNIA (2013), CHIOU Y YOUNGS (2013), Y EL MÉTODO I-DCM (ARRIBA) CON LA MUESTRA DE EDIFICIOS EVALUADA EN LA VISITA A CAMPO (ARRIBA) Y CON LAS MUESTRAS DEFINIDAS CON EL MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DE MONTECARLO (ABAJO).	305
FIGURA 6.29. COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑOS RESULTANTE DEL ESTUDIO DE RIESGO CON EL TRIAJE REALIZADO EN LORCA TRAS EL TERREMOTO DEL 2011. LOS COLORES DEL GRÁFICO REPRESENTAN LOS DIFERENTES GRADOS DE DAÑO (EN CELESTE % EDIFICIOS SIN DAÑOS, EN VERDE CLARO % EDIFICIOS CON DAÑO LEVE, EN CREMA % EDIFICIOS CON DAÑO MODERADO, EN NARANJA % EDIFICIOS CON DAÑO EXTENSO Y EN GRIS % EDIFICIOS CON DAÑO COMPLETO). LAS COLUMNAS REPRESENTAN EL 100% DE LOS EDIFICIOS CATALOGADOS EN COLOR VERDE, AMARILLO, ROJO Y EN RUINA SEGÚN EL TRIAJE.....	308
FIGURA 6.30. CORRESPONDENCIA DE NÚMERO DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑO OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE RIESGO CON RESPECTO AL TRIAJE REALIZADO EN LORCA TRAS EL TERREMOTO DEL 2011. EL COLOR VERDE REPRESENTA LOS EDIFICIOS CATALOGADOS CON ESTE COLOR SEGÚN EL TRIAJE, CORRESPONDIENTES A EDIFICIOS HABITABLES, EL COLOR AMARILLO REPRESENTA LOS EDIFICIOS CATALOGADOS CON USO RESTRINGIDO, EL COLOR ROJO REPRESENTA LOS EDIFICIOS CATALOGADOS CON ESTE COLOR POR DAÑO ESTRUCTURALES SEVEROS QUE PROHIBÍAN SU USO, Y EL COLOR NEGRO REPRESENTA LOS EDIFICIOS COLAPSADOS, CON RIESGO INMINENTE DE COLPADO Y DECLARADOS EN RUINA TÉCNICA.	309
FIGURA 7.1. VISTA EN PLANTA DE LA LOCALIZACIÓN DEL PLANO DE RUPTURA DEL SISMO MW 6.5 GENERADO CON RESPECTO A LA CIUDAD DE LORCA (EN VERDE).	315
FIGURA 7.2. BARRIOS CON LOS MAYORES ESPECTROS DE RESPUESTA OBTENIDOS EN LA CLASE DE SUELO B DE CIUDAD DE LORCA, SEGÚN EL MODELO DE A) ASK13, B) CB13, C) CY13 Y D) MP12, PARA EL SISMO MW 6.5.....	317
FIGURA 7.3. BARRIOS CON LOS MAYORES ESPECTROS DE RESPUESTA OBTENIDOS EN SUELO C DE CIUDAD DE LORCA, SEGÚN EL MODELO DE A) ASK13, B) CB13, C) CY13 Y D) MP12, PARA EL SISMO MW 6.5.....	318
FIGURA 7.4. BARRIOS CON LOS MAYORES ESPECTROS DE RESPUESTA OBTENIDOS EN LA CLASE DE SUELO D DE CIUDAD DE LORCA, SEGÚN EL MODELO DE A) ASK13, B) CB13, C) CY13 Y D) MP12, PARA EL SISMO MW 6.5.....	318
FIGURA 7.5. ESPECTRO DE RESPUESTA MÁXIMA OBTENIDO EN LA CLASE DE SUELO E DE CIUDAD DE LORCA PARA EL SISMO MW 6.5, SEGÚN EL MODELO DE A) ASK13, B) CB13, C) CY13 Y D) MP12.	319
FIGURA 7.6. ÁRBOL LÓGICO ESTABLECIDO PARA LA ESTIMACIÓN DE GRADOS DE DAÑO EN LOS EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE LORCA PARA EL ESCENARIO ASOCIADO AL SISMO MW 6.5 Y PR975.	320
FIGURA 7.7. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE DAÑO EN LOS EDIFICIOS, SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE GRADOS DE DAÑO DE RISK-UE: NULO, LIGERO, MODERADO, EXTENSO Y COMPLETO, EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA, PARA EL SISMOS DE MW6.5.....	323
FIGURA 7.8. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS CON DIFERENTES GRADOS DE DAÑO (ARRIBA) Y DEL ÍNDICE DE DAÑO MEDIO (ABAJO) EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA, PARA EL SISMO DE MW6.5.	324
FIGURA 7.9. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS INHABITABLES (ARRIBA) Y PERSONAS QUE RESULTARÍAN SIN HOGAR (ABAJO) PARA EL SISMO DE MW5.2, EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA.	326
FIGURA 7.10. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VÍCTIMAS MORTALES (ARRIBA) Y HERIDOS DE DIFERENTES GRADOS: CON CARÁCTER DE URGENCIA, QUE NECESITAN ATENCIÓN MÉDICA Y HERIDOS LEVES, JUNTO AL NÚMERO TOTAL DE HERIDOS (ABAJO), EN LOS DIFERENTES BARRIOS DE CIUDAD DE LORCA.	329
FIGURA 7.11. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS ASOCIADAS AL ESCENARIO DEL SISMO DE MW6.5. ARRIBA: COSTES TOTALES POR BARRIO. ABAJO: COSTES DE RECONSTRUCCIÓN (EN MILLONES DE EUROS); ABAJO: COSTES DE REPARACIÓN TOTALES, Y SEGÚN EL TIPO DE REPARACIÓN: LIGERA, MODERADA Y EXTENSA.	332
FIGURA 3.12. ESQUEMA DE UN ANÁLISIS DE COMPLETITUD, DONDE SE OBSERVAN LOS RANGOS DE MAGNITUD QUE HAN SIDO REGISTRADOS COMPLETAMENTE. EJE IZQ: AÑO DE REFERENCIA PARA CADA RANGO DE MAGNITUD, IZQ. ARRIBA: AOC = AÑO ORIGEN DEL CATÁLOGO, IZQ. ABAJO: AÑO ACTUAL; EJE DER.: PERIODO DE COMPLETITUD PARA CADA RANGO DE MAGNITUD (PC(M)), DER. ARRIBA: POC = PERIODO DE OBSERVACIÓN DEL CATÁLOGO.	371

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: CLASIFICACIÓN DEL TERRENO PROPUESTA POR BORCHERDT, 1994.....	41
TABLA 2-2: CLASIFICACIÓN DEL TERRENO PROPUESTA POR LA NCSE-02	41
TABLA 2-3: CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS Y SUSCEPTIBILIDAD DE AMPLIFICACIÓN DEL NEHRP (2003)...	42
TABLA 2-4: CLASIFICACIÓN DE SUELOS PROPUESTA POR SISMOSAN (2007).....	42
TABLA 2-5. CLASIFICACIÓN DEL TERRENO DEL EUROCÓDIGO 8.	42
TABLA 2-6: COMPARATIVA DE LOS FACTORES DE AMPLIFICACIÓN REFLEJADOS EN EL SISMOSAN, RISMUR, EUROCODE Y NCSE-02.....	43
TABLA 2-7. GRADOS DE DAÑO Y CORRESPONDENCIA ENTRE DIFERENTES ESCALAS.....	54
TABLA 3-1. CORRELACIONES UTILIZADAS ENTRE DISTINTOS PARÁMETROS DE TAMAÑO Y MW EN EL MPSE (IGN-UPM, 2012).	70
TABLA 3-2. VARIABLES UTILIZADAS POR LOS MODELOS DE LA NGA W2. (CELDA COLOREADA = PARÁMETRO INCLUIDO).....	86
TABLA 3-3. TABLA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS DEL NEHRP Y SU CORRESPONDENCIA CON LA CLASIFICACIÓN DE LA NSCE-02 Y EUROCÓDIGO 8 (EC8). (LICUEF. = LICUEFACCIÓN).	96
TABLA 3-4. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO, PERIODOS ESTRUCTURALES Y VALORES DE ACCELERACIÓN BASE SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE SUELO DEL NEHRP (2009).	98
TABLA 3-5. EJEMPLO DE MATRIZ DE TRANSFERENCIA PARA DETERMINAR LAS EQUIVALENCIAS DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DEL SITIO A LOS TIPOS DE VULNERABILIDAD DE LA ESCALA MACROSÍSMICA EMS 98 Y METODOLOGÍA RISK-UE.	106
TABLA 3-6. MATRIZ DE TRANSFERENCIA PARA DETERMINAR LAS EQUIVALENCIAS DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE CASTILLA-LA MANCHA A LOS TIPOS DE VULNERABILIDAD DEL FEMA EN MUNICIPIOS CON PELIGROSIDAD SÍSMICA > 0.04g. FUENTE: MURPHY, P.	108
TABLA 3-7. CORRESPONDENCIAS ENTRE LOS MODELOS DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE HAZUS, RISK-UE Y L&G. (NOTA: SE HAN RESALTADOS LAS TIPOLOGÍAS EMPLEADAS EN ESTE ESTUDIO Y SE HA INDICADO SU NOMENCLATURA).....	116
TABLA 3-8. GRADOS DE DAÑO, SEGÚN RISK-UE (MILUTINOVIC&TRENDAFILOSKI, 2003).	126
TABLA 3-9. INTERVALOS DE VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE DAÑO MEDIO (DM) PARA CADA GRADO DE DAÑO.	129
TABLA 3-10. PORCENTAJE MEDIO DE PERSONAS ATRAPADAS POR COLAPSO, DEPENDIENDO DE LA INTENSIDAD DEL MOVIMIENTO.	131
TABLA 3-11. PORCENTAJE DE VÍCTIMAS POR COLAPSO EN DIFERENTES TIPOLOGÍAS CON DISTINTO TIPO DE DAÑO FÍSICO.	131
TABLA 3-12. GRADO DE INTENSIDAD MACROSÍSMICA Y SU CORRESPONDIENTE DESCRIPCIÓN, SEGÚN LA ESCALA MSK.....	132
TABLA 3-13. PORCENTAJE DE PERSONAS ATRAPADAS ENTRE LOS ESCOMBROS QUE MUEREN EN FUNCIÓN DE LA RESPUESTA POST-EVENTO.....	132
TABLA 4-1. FALLAS O SEGMENTOS QUE NO TIENEN LA INFORMACIÓN SUFICIENTE PARA PODER SER MODELIZADAS DE MODO INDIVIDUAL EN EL CÁLCULO DE PELIGROSIDAD. L: LONGITUD DE LA TRAZA DE LA FALLA O SEGMENTO, W: ANCHO, ZMIN Y ZMAX: PROFUNDIDAD MÁXIMA Y MÍNIMA. SR: SLIP RATE (TASA DE DESLIZAMIENTO).	142
TABLA 4-2. FALLAS INCLUIDAS EN LA BASE DE DATOS FINAL DE CÁLCULO PROVENIENTES DE LA BASE DE DATOS QAFI, QUE NO HAN SIDO INICIALMENTE INCLUIDAS EN QAFIMUR. AZIM., BUZ. Y DIR.: AZIMUTH, BUZAMIENTO Y DIRECCIÓN DE LA FALLA (EN GRADOS), RESPECTIVAMENTE, L: LONGITUD DE LA TRAZA DE LA FALLA O SEGMENTO (EN KM), W: ANCHO DE LA FALLA (EN KM), ZMIN Y ZMAX: PROFUNDIDAD MÁXIMA Y MÍNIMA (EN KM). SR: SLIP RATE (TASA DE DESLIZAMIENTO) EN (MM/AÑO).	143
TABLA 4-3. FALLAS Y SEGMENTOS DE FALLA INCLUIDOS EN EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA. AZIM., BUZ. Y DIR.: AZIMUTH, BUZAMIENTO Y DIRECCIÓN DE LA FALLA (EN GRADOS), RESPECTIVAMENTE, L: LONGITUD DE LA TRAZA DE LA FALLA O SEGMENTO (EN KM), W: ANCHO DE LA FALLA (EN KM), ZMIN Y ZMAX: PROFUNDIDAD MÁXIMA Y MÍNIMA (EN KM). SR: SLIP RATE (TASA DE DESLIZAMIENTO) EN (MM/AÑO).	144
TABLA 4-4. TASAS DE DESLIZAMIENTO (MM/AÑO) Y PROFUNDIDADES DE BLOQUEO (EN KM) OBTENIDAS A PARTIR DE TÉCNICAS GEODÉSICAS.	145
TABLA 4-5. INCERTIDUMBRES ASOCIADAS A LOS PARÁMETROS ORIGINALES DE TAMAÑO EN EL CATÁLOGO SÍSMICO.	152
TABLA 4-6. AÑOS DE REFERENCIA CONSIDERADOS PARA LA CORRECCIÓN POR FALTA DE COMPLETITUD DE DIFERENTES RANGOS DE MAGNITUD.	154
TABLA 4-7. NÚMERO DE EVENTOS DEL CATÁLOGO FINAL DE PROYECTO, POR PERIODOS DE ACTUALIZACIÓN DE LA RED SÍSMICA.	154

TABLA 4-8. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL CATÁLOGO DE PROYECTO	154
TABLA 4-9. PARÁMETROS DE LA RECTA GUTENBERG-RICHTER Y MAGNITUDES MÁXIMAS PARA LAS ZONAS SISMOGÉNICAS DE GM12.	158
TABLA 4-10. TASAS DE SISMICIDAD Y DE MOMENTO SÍSMICO OBSERVADOS EN CADA REGIÓN, PARA EL INTERVALO [MMIN, MMC], ASÍ COMO LOS VALORES DE B OBTENIDOS. MMC REPRESENTA LA MAGNITUD MÁXIMA DE COMPLETITUD DE CADA REGIÓN.	162
TABLA 4-11. PARÁMETRO OBTENIDO PARA LAS FALLAS.....	163
TABLA 4-12. TASAS SÍSMICAS Y DE MOMENTO SÍSMICO DE LAS FALLAS DE LA ZONA 30 PARA EL REPARTO EN EL INTERVALO [MMIN,MMC] (COLOR NARANJA MEDIO) Y EN EL INTERVALO [MMIN,MMAX] (COLOR NARANJA OSCURO). EL GRÁFICO BAJO LA TABLA MUESTRA LAS MAGNITUDES MÁXIMAS DE CADA FALLA Y LA MMC OBSERVADA EN LA ZONA, MMIN=4.0.	164
TABLA 4-13. TASAS SÍSMICAS Y DE MOMENTO SÍSMICO DE LAS FALLAS DE LA ZONA 31 PARA EL REPARTO EN EL INTERVALO [MMIN,MMC] (COLOR NARANJA MEDIO) Y EN EL INTERVALO [MMIN,MMAX] (COLOR NARANJA OSCURO). EL GRÁFICO BAJO LA TABLA MUESTRA LAS MAGNITUDES MÁXIMAS DE CADA FALLA Y LA MMC OBSERVADA EN LA ZONA, MMIN=4.0.	165
TABLA 4-14. TASAS SÍSMICAS Y DE MOMENTO SÍSMICO DE LAS FALLAS DE LA ZONA 37 PARA EL REPARTO EN EL INTERVALO [MMIN,MMC] (COLOR NARANJA MEDIO) Y EN EL INTERVALO [MMIN,MMAX] (COLOR NARANJA OSCURO). EL GRÁFICO BAJO LA TABLA MUESTRA LAS MAGNITUDES MÁXIMAS DE CADA FALLA Y LA MMC OBSERVADA EN LA ZONA, MMIN=4.0.	166
TABLA 4-15. TASAS SÍSMICAS Y DE MOMENTO SÍSMICO DE LAS FALLAS DE LA ZONA 38 PARA EL REPARTO EN EL INTERVALO [MMIN,MMC] (COLOR NARANJA MEDIO) Y EN EL INTERVALO [MMIN,MMAX] (COLOR NARANJA OSCURO). EL GRÁFICO BAJO LA TABLA MUESTRA LAS MAGNITUDES MÁXIMAS DE CADA FALLA Y LA MMC OBSERVADA EN LA ZONA, MMIN=4.0.	167
TABLA 4-16. TASAS SÍSMICAS Y DE MOMENTO SÍSMICO DE LAS FALLAS DE LA ZONA 39 PARA EL REPARTO EN EL INTERVALO [MMIN,MMC] (COLOR NARANJA MEDIO) Y EN EL INTERVALO [MMIN,MMAX] (COLOR NARANJA OSCURO).....	168
TABLA 4-17. REPARTO DE LAS TASAS DE SISMICIDAD Y MOMENTO SÍSMICO OBTENIDO CON LOS SLIP RATES DEL QAFI (%: REPRESENTA EL PORCENTAJE DE TASA DE MOMENTO SÍSMICO DE LA REGIÓN ASOCIADO A LAS FALLAS Y A LA ZONA EN EL INTERVALO DE MAGNITUDES REGISTRADAS DE FORMA COMPLETA EN EL CATÁLOGO (MMIN, MMC). %= $\dot{M}_0 (M_{MIN} - MMC)$ FALLA O ZONA/ $\dot{M}_0 (M_{MIN} - MMC)$ REGIÓN.....	169
TABLA 4-18. REPARTO DE LAS TASAS DE SISMICIDAD Y MOMENTO SÍSMICO CON LOS SLIP RATES EN LAS ZONAS 37 Y 38, CON LAS FALLAS CON SLIP RATES OBTENIDOS POR GEODESIA. (%: REPRESENTA EL PORCENTAJE DE TASA DE MOMENTO SÍSMICO DE LA REGIÓN ASOCIADO A LAS FALLAS Y A LA ZONA EN EL INTERVALO DE MAGNITUDES REGISTRADAS DE FORMA COMPLETA EN EL CATÁLOGO (MMIN, MMC). %= $\dot{M}_0 (M_{MIN} - MMC)$ FALLA O ZONA/ $\dot{M}_0 (M_{MIN} - MMC)$ REGIÓN.	169
TABLA 4-19. PARÁMETROS DE LAS FUENTES FINALES PARA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD (SLIP RATES DEL QAFI).	170
TABLA 4-20. PARÁMETROS DE LAS FUENTES FINALES CON SLIP RATES DE GEODESIA, PARA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD.....	170
TABLA 4-21. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN POR EL MÉTODO DE SHERBAUM ET. AL (2004) PARA LOS CINCO MODELOS DE ATENUACIÓN CALIBRADOS PARA PGA, Sa(0.1s) Y Sa(1.0s).	172
TABLA 4-22. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN POR EL MÉTODO DE KALE Y AKKAR (2012) PARA LOS CINCO MODELOS DE ATENUACIÓN CALIBRADOS PARA PGA, Sa(0.1s) Y Sa(1.0s).	173
TABLA 4-23. COMPARACIÓN DE VALORES DE Vs30 OBTENIDOS MEDIANTE EL MÉTODO SPAC Y EL MÉTODO MASW EN EL RECINTO FERIAL DE LORCA Y EL BARRIO DE LA VIÑA EN CIUDAD DE LORCA. FIGURAS: CURVAS DE DISPERSIÓN Y PERFILES DE VELOCIDADES Vs OBTENIDOS Y VALIDADOS CON TÉCNICAS SPAC Y MASW EN DOS ESTACIONES DE CIUDAD DE LORCA.	177
TABLA 4-24. NIVELES DE ACELERACIÓN PARA LOS QUE SE REALIZARÁ EL CÁLCULO DE LA TASA ANUAL DE EXCEDENCIA, EN CADA ORDENADA ESPECTRAL.	181
TABLA 4-25. PARES (M,R) OBTENIDOS SEGÚN LAS DIFERENTES RAMAS DE CÁLCULO DEL ÁRBOL LÓGICO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA.	203
TABLA 4-26 RESUMEN DE LOS SISMOS DE CONTROL OBTENIDOS POR DESAGREGACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS (SISMO PROBABLE) Y PARA 975 AÑOS (SISMO EXTREMO).....	207
TABLA 5-1. PARÁMETROS DE LA FALLA DE ALHAMA DE MURCIA, SEGMENTO LORCA-TOTANA, UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DEL ESCENARIO 1.....	213
TABLA 5-2. COORDENADAS Y PROFUNDIDAD DEL PLANO DE RUPTURA GENERADO PARA EL SISMO DE Mw5.2.	214
TABLA 5-3. VALORES DE ACELERACIÓN PGA OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISMO Mw 5.2, PARA LOS CUATRO MODELOS DE ATENUACIÓN EMPLEADOS, SIENDO Y LA ACELERACIÓN MEDIA, Y Σ LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL MODELO.....	216
TABLA 5-4. BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA Y NÚMERO DE EDIFICIOS Y DE VIVIENDAS CONTENIDOS EN CADA UNO DE ELLOS, OBTENIDOS DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CATASTRO.	219

TABLA 5-5. TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS PRESENTES EN LA CIUDAD DE LORCA.....	228
TABLA 5-6. MATRIZ DE TRANSFERENCIA APLICADA PARA LA ASIGNACIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS IDENTIFICADAS EN LA CIUDAD DE LORCA, EN FUNCIÓN DEL AÑO DE CONSTRUCCIÓN Y DEL NÚMERO DE PLANTAS DE LOS EDIFICIOS.	228
TABLA 5-7. PARÁMETROS QUE DEFINEN LOS ESPECTROS DE CAPACIDAD UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE DAÑOS. DY Y AY REPRESENTAN EL DESPLAZAMIENTO Y LA ACELERACIÓN EN EL PUNTO DE FLUENCIA, DU Y AU REPRESENTAN EL DESPLAZAMIENTO Y ACELERACIÓN EN EL PUNTO ÚLTIMO, RESPECTIVAMENTE.	235
TABLA 5-8. UMBRALES DE CADA ESTADO DE DAÑO ESTABLECIDOS POR HAZUS Y LAGOMARSINO Y GIOVANNAZI (2006), DONDE SD_i ES EL DESPLAZAMIENTO MEDIO ESTABLECIDO PARA CADA ESTADO DE DAÑO I.....	236
TABLA 5-9. PARÁMETROS QUE DEFINEN LAS CURVAS DE FRAGILIDAD UTILIZADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE GRADOS DE DAÑOS.	237
TABLA 5-10. MATRIZ DE PROBABILIDAD DE DAÑO RESULTANTE DE LA ESTIMACIÓN DE DAÑOS EN EDIFICIOS A TRAVÉS DE LOS MÉTODOS DE CAPACIDAD-DEMANDA PARA LOS DIFERENTES BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA. D_0 REPRESENTA EL DAÑO NULO, D_1 EL DAÑO LEVE, D_2 EL DAÑO MODERADO, D_3 EL DAÑO EXTENSO, D_4 EL DAÑO COMPLETO Y DM ES EL ÍNDICE DE DAÑO MEDIO.	238
TABLA 5-11. NÚMERO DE EDIFICIOS Y VIVIENDAS CON CADA GRADO DE DAÑO EN LOS BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA. E Y V REPRESENTAN EL NÚMERO TOTAL DE EDIFICIOS Y VIVIENDAS CONTENIDOS EN CADA BARRIO, ED_i Y VD_i REPRESENTAN EL NÚMERO DE EDIFICIOS Y VIVIENDAS CON CADA GRADO DE DAÑO I, RESPECTIVAMENTE.	239
TABLA 5-12. NÚMERO DE VIVIENDAS INHABITABLES Y PERSONAS QUE QUEDARÍAN SIN HOGAR PARA EL ESCENARIO DEL SISMO Mw 5.2, EN CIUDAD DE LORCA.	242
TABLA 5-13. NÚMERO DE EDIFICIOS Y VIVIENDAS QUE ALCAZARÍAN EL COLAPSO, Y NÚMERO DE VÍCTIMAS MORTALES Y HERIDOS DE DIFERENTES GRADOS, ASOCIADOS A ESTE DAÑO, PARA EL ESCENARIO DEFINIDO POR EL SISMO Mw 5.2 EN CIUDAD DE LORCA.	245
TABLA 5-14. EQUIPARACIÓN DE GRADOS DE DAÑO DEFINIDOS EN LA METODOLOGÍA EMPLEADA (RISK-UE) Y EL TRIAJE DE EVALUACIÓN DE EDIFICIOS REALIZADO EN LORCA TRAS EL TERREMOTO DE 2011.	247
TABLA 5-15. COSTES DE RECONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN ESTIMADOS PARA LAS VIVIENDAS CON DIFERENTES GRADOS DE DAÑO EN LOS BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA. VD_i REPRESENTA EL NÚMERO DE VIVIENDAS CON GRADO DE DAÑO I ($i=0$ PARA DAÑO NULO, 1 PARA DAÑO LIGERO, 2 PARA DAÑO MODERADO, 3 PARA DAÑO EXTENSO Y 4 PARA DAÑO COMPLETO). RECONSTRUCCIÓN REPRESENTA LOS COSTES DE RECONSTRUCCIÓN DE LAS VIVIENDAS CON DAÑO COMPLETO, Y REP. EXTENSA, REP. MODERADA Y REP. LIGERA LOS COSTES DE REPARACIÓN DE LAS VIVIENDAS CON DAÑO EXTENSO, MODERADO Y LEVE, RESPECTIVAMENTE.	249
TABLA 6-1. HIPOCENTROS LOCALIZADOS EN LOS ESTUDIOS DE LÓPEZ-COMINO, ET AL. (2012), MARTÍNEZ-DÍAZ ET AL. (2012A), SANTOYO (2013), Y EL IGN.	255
TABLA 6-2. CARACTERÍSTICAS DE LA RUPTURA MODELIZADA POR LÓPEZ-COMINO (2012), MARTÍNEZ-DÍAZ (2012A), SANTOYO (2012), Y EL IGN.	255
TABLA 6-3. ACELERACIONES OBTENIDAS DE LA SIMULACIÓN DE LOS PLANOS DE RUPTURA DE LÓPEZ-COMINO ET AL. (2012), MARTÍNEZ-DÍAZ ET AL. (2012), SANTOYO (2013) Y DEL IGN, JUNTO CON LAS ACELERACIONES REGISTRADAS EN LAS DISTINTAS ESTACIONES DEL IGN EN LA REGIÓN DE MURCIA. PGA (MG) REPRESENTA LA MEDIA GEOMÉTRICA DE LAS 2 COMPONENTES HORIZONTALES REGISTRADAS. SE INDICAN LAS ACELERACIONES MEDIAS PREDICHAS POR LOS MODELOS.	259
TABLA 6-4. ACELERACIONES ESPECTRALES REGISTRADAS DURANTE EL TERREMOTO DE LORCA DE 2011 EN LAS COMPONENTES NORTE-SUR (NS) Y ESTE-OESTE (EW) Y LA MEDIA GEOMÉTRICA DE LAS MISMAS (MG), EN COMPARACIÓN CON LAS ACELERACIONES OBTENIDAS CON LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE ABRAHAMSON ET AL. (ASK13), CAMPBELL Y BOZORGNI (CB13), CHIOU Y YOUNGS (CY13) Y EL MODELO PROPIO DE RUIZ ET AL. (MP12). ESTAS REPRESENTAN LA MEDIA GEOMÉTRICA DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES. TODOS LOS VALORES ESTÁN DADOS EN G.	263
TABLA 6-5. VALORES DE ACELERACIÓN PARA DIFERENTES ORDENADAS ESPECTRALES OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISMO Mw 5.2, PARA LOS CUATRO MODELOS DE ATENUACIÓN EMPLEADOS, SIENDO Y LA ACELERACIÓN MEDIA DEL MODELO, $Y+\Sigma$ LA ACELERACIÓN MÁS LA SIGMA DEL MODELO Y $Y-\Sigma$ LA ACELERACIÓN MENOS LA SIGMA DEL MODELO.	265
TABLA 6-6. VALORES ESTADÍSTICOS OBSERVADOS PARA LOS EDIFICIOS CON DAÑO NULO RESULTANTES DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS PARA LAS DISTINTAS DISTRIBUCIONES DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS CON TAMAÑO DE MUESTRAS DE 100 A 3000 EDIFICIOS.	279
TABLA 6-7. VALORES ESTADÍSTICOS OBSERVADOS PARA LOS EDIFICIOS CON DAÑO LEVE RESULTANTES DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS PARA LAS DISTINTAS DISTRIBUCIONES DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS CON TAMAÑO DE MUESTRAS DE 100 A 3000 EDIFICIOS.	280
TABLA 6-8. VALORES ESTADÍSTICOS OBSERVADOS PARA LOS EDIFICIOS CON DAÑO MODERADO RESULTANTES DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS PARA LAS DISTINTAS DISTRIBUCIONES DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS CON TAMAÑO DE MUESTRAS DE 100 A 3000 EDIFICIOS.	281
TABLA 6-9. VALORES ESTADÍSTICOS OBSERVADOS PARA LOS EDIFICIOS CON DAÑO EXTENSO OBTENIDOS DE LAS SIMULACIONES	

REALIZADAS PARA LAS DISTINTAS DISTRIBUCIONES DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS CON TAMAÑO DE MUESTRAS DE 100 A 3000 EDIFICIOS.	282
TABLA 6-10. VALORES ESTADÍSTICOS OBSERVADOS PARA LO EDIFICIOS CON DAÑO COMPLETO OBTENIDOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS PARA LAS DISTINTAS DISTRIBUCIONES DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS CON TAMAÑO DE MUESTRAS DE 100 A 10000 EDIFICIOS.	283
TABLA 6-11. VALORES ESTADÍSTICOS OBSERVADOS DE DISTRIBUCIÓN DE DAÑO PARA EL PARQUE INMOBILIARIO DE LORCA CONSIDERANDO DISTINTOS MODELOS DE ATENUACIÓN Y MÉTODOS CAPACIDAD-DEMANDA.....	289
TABLA 6-12. DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS EN INMUEBLES Y VIVIENDAS PUBLICADOS POR LA DELEGACIÓN DE GOBIERNO DE LA REGIÓN DE MURCIA. (MAYO 2012)	299
TABLA 6-13. DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS EN EDIFICIOS PUBLICADOS POR EL AYUNTAMIENTO DE MURCIA EN SU SERVICIO DE INFORMACIÓN PÚBLICA EN LA FECHA ACTUAL.....	299
TABLA 6-14. RESULTADOS DE NÚMERO DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑO OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DEL TERREMOTO DE LORCA CON LOS MODELOS DE ATENUACIÓN DE ABRAHAMSON ET AL. (2013), CAMPBELL Y BOZORGNIA (2013), CHIOU Y YOUNGS (2013), Y LOS MÉTODOS DE CAPACIDAD-DEMANDA I-DCM Y MADRS.	304
TABLA 6-15. DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS SEGÚN TRIAJE DE COLOR REALIZADO TRAS EL TERREMOTO DE LORCA, A FECHA DE 15 DE JULIO DE 2011, EN LOS EDIFICIOS EVALUADOS EN CAMPO.	304
TABLA 6-16. RESULTADOS DE DAÑO EN EDIFICIOS POR CADA GRADO DE DAÑO PARA LA SIMULACIÓN REALIZADA CON EL MODELO DE ATENUACIÓN DE CAMPBELL Y BOZORGNIA (2013) Y LA MUESTRA DE EDIFICIOS EVALUADA EN CAMPO, Y PARA LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON EL MISMO MODELO PARA LAS MUESTRAS DEFINIDAS CON EL MÉTODO DE MONTECARLO DE ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD, Y SU COMPARACIÓN CON EL TRIAJE DE EVALUACIÓN DE EDIFICIOS REALIZADO EN LORCA TRAS EL TERREMOTO DE 2011.	305
TABLA 6-17. RESULTADOS DE NÚMERO DE EDIFICIOS CON CADA GRADO DE DAÑO PARA LA SIMULACIÓN REALIZADA CON LA MUESTRA EVALUADA EN CAMPO Y SU COMPARACIÓN CON EL TRIAJE DE COLORES REALIZADOS EN ESOS EDIFICIOS TRAS EL TERREMOTO DE LORCA, A FECHA DE 15 DE JULIO DE 2012.....	306
TABLA 6-18. RESULTADOS DE NÚMERO DE EDIFICIOS CON DISTINTOS GRADOS D DAÑO, OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISMO MW5.2 PARA EL ESCENARIO PR475.	307
TABLA 6-19. DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS OBSERVADOS TRAS EL TERREMOTO DE LORCA SEGÚN EL VISOR DE DAÑO DEL AYUNTAMIENTO DE LORCA A FECHA ACTUAL.	307
TABLA 7-1. CARACTERÍSTICAS DEL PLANO DE RUPTURA MODELADO PARA LA SIMULACIÓN DEL SISMO ASOCIADO AL ESCENARIO DE PR975.....	315
TABLA 7-2. COORDENADAS Y PROFUNDIDAD DEL PLANO DE RUPTURA GENERADO PARA EL SISMO DE MW6.5.	315
TABLA 7-3. VALORES DE ACELERACIÓN PGA OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISMO MW 5.2, PARA LOS TRES MODELOS DE ATENUACIÓN EMPLEADOS, SIENDO Y LA ACELERACIÓN MEDIA DEL MODELO, Y+ Σ LA ACLERACIÓN MÁS LA SIGMA DEL MODELO Y Y- Σ LA ACELERACIÓN MENOS LA SIGMA DEL MODELO.	317
TABLA 7-4. MATRIZ DE PROBABILIDAD DE DAÑO RESULTANTE DE LA ESTIMACIÓN DE DAÑOS EN EDIFICIOS A TRAVÉS DE LOS MÉTODOS DE CAPACIDAD-DEMANDA PARA LOS DIFERENTES BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA. D ₀ REPRESENTA EL DAÑO NULO, D ₁ EL DAÑO LEVE, D ₂ EL DAÑO MODERADO, D ₃ EL DAÑO EXTENSO, D ₄ EL DAÑO COMPLETO Y DM ES EL ÍNDICE DE DAÑO MEDIO.	322
TABLA 7-5. NÚMERO DE EDIFICIOS Y VIVIENDAS CON CADA GRADO DE DAÑO EN LOS BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA. E Y V REPRESENTAN EL NÚMERO TOTAL DE EDIFICIOS Y VIVIENDAS CONTENIDOS EN CADA BARRIO, ED _i Y VD _i REPRESENTAN EL NÚMERO DE EDIFICIOS Y VIVIENDAS CON CADA GRADO DE DAÑO I, RESPECTIVAMENTE.	322
TABLA 7-6. NÚMERO DE VIVIENDAS INHABITABLES Y PERSONAS QUE QUEDARÍAN SIN HOGAR PARA EL ESCENARIO DEL SISMO MW 6.5, EN CIUDAD DE LORCA.	325
TABLA 7-7. NÚMERO DE EDIFICIOS Y VIVIENDAS QUE ALCAZARÍAN EL COLAPSO, Y NÚMERO DE VÍCTIMAS MORTALES Y HERIDOS DE DIFERENTES GRADOS, ASOCIADOS A ESTE DAÑO, PARA EL ESCENARIO DEFINIDO POR EL SISMO MW 6.5 EN CIUDAD DE LORCA.	328
TABLA 7-8. COSTES DE RECONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN ESTIMADOS PARA LAS VIVIENDAS CON DIFERENTES GRADOS DE DAÑO EN LOS BARRIOS DE LA CIUDAD DE LORCA. VD _i REPRESENTA EL NÚMERO DE VIVIENDAS CON GRADO DE DAÑO I (i=0 PARA DAÑO NULO, 1 PARA DAÑO LIGERO, 2 PARA DAÑO MODERADO, 3 PARA DAÑO EXTENSO Y 4 PARA DAÑO COMPLETO). RECONSTRUCCIÓN REPRESENTA LOS COSTES DE RECONSTRUCCIÓN DE LAS VIVIENDAS CON DAÑO COMPLETO, Y REP. EXTENSA, REP. MODERADA Y REP. LIGERA LOS COSTES DE REPARACIÓN DE LAS VIVIENDAS CON DAÑO EXTENSO, MODERADO Y LEVE, RESPECTIVAMENTE.	331
TABLA 3-3. DEFINICIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE SEGÚN SU GRADO DE AJUSTE A UNA CIERTA BASE DE DATOS ACELEROMÉTRICA. A: MEJOR AJUSTE, D: PEOR AJUSTE.	378

ANEXOS

Anexo A. DETALLE DEL MÉTODO HÍBRIDO DE ZONAS Y FALLAS (MH)

El modelo propuesto por Rivas-Medina (2014) se basa en un método híbrido donde las fallas activas conocidas serán modelizadas como fuentes independientes y las zonas sismogénicas representarán el conjunto de fallas pequeñas desconocidas que no pueden ser modelizadas de forma independiente por no conocer suficientemente sus características geométricas y mecánicas.

La metodología citada establece el reparto del potencial sísmico de las fuentes individuales por medio del reparto de la tasa de momento sísmico registrada en la región entre la tasa de momento sísmico acumulado en las fallas incluidas en dicha región y la que queda residual en la zona, entendiendo por zona la misma geometría que la región pero con menor sismicidad, al descontar de ella la correspondiente a las fallas. Por lo tanto, se entiende por 'región' la suma de la zona más las fallas contenidas en ella.

Ilustración 1. Reparto de potencial sísmico de una región en diferentes fuentes.

Al igual que la metodología de Bungum (2007), en este modelo se iguala el momento sísmico anual liberado en la región con el momento sísmico anual acumulado en la misma; sin embargo, se incorporan una serie de condiciones para el reparto de tasas de momento sísmico, expuestas a continuación:

- La tasa sísmica anual observada en cada región, por medio del registro sísmico, se mantendrá constante, independientemente de las fuentes sísmicas consideradas.
- El reparto del potencial sísmico no se hará con todo el registro sísmico, sino con aquel que con mayor probabilidad ha sido registrado de forma completa en la región,

atendiendo a la magnitud de los sismos y a la cobertura espacio-temporal de estaciones del área de estudio. En otras palabras, el reparto del potencial sísmico se realizará solo en el periodo en el que el catálogo sísmico puede considerarse completo para cada rango de magnitud y en un intervalo de magnitudes determinado.

- El potencial sísmico de la falla que se sustrae del potencial sísmico regional para obtener el de la zona, no será el de toda la falla, sino solo aquel que haya sido registrado en el periodo en el que se considera que el catálogo es completo.

El registro sísmico de la región viene dado por el catálogo de eventos. Sin embargo, como el catálogo no proporciona información sobre el potencial sísmico completo de las fuentes, ya que generalmente los catálogos no abarcan el rango de tiempo necesario para cubrir los ciclos sísmicos de las fallas, el reparto del potencial sísmico se hará solo con los intervalos de tiempo del catálogo que se consideren completos para cada magnitud. Para esto se partirá de los años de referencia de las magnitudes, estimados de acuerdo a lo expuesto en el *Apartado 3.3.1.1.3*.

Al periodo de tiempo que transcurre desde el año de referencia de una magnitud m hasta el año del último registro del catálogo sísmico se le da la denominación de *Periodo de Completitud* [$PC(m)$]. Este periodo de tiempo fijará el intervalo temporal en el que se supone que todos los sismos de una cierta magnitud m ocurridos en un área de estudio han sido registrados en el catálogo.

Este periodo de completitud se obtiene restando al año del último registro considerado en el catálogo (UAC) (común a todas las magnitudes) el año de referencia de cada magnitud [$AR(m)$].

$$PC(m) = UAC - AR(m) \quad [1]$$

Del mismo modo, se debe identificar el intervalo de magnitudes que pueden haber sido registradas de forma completa en el catálogo, estableciendo una magnitud mínima de corte ($Mmin$) y una magnitud máxima de completitud (MMC), que se corresponde con la magnitud máxima del catálogo cuyo periodo de completitud ($PC(m)$) está contenido en el periodo de observación del catálogo (Figura 3.12). La magnitud mínima de corte corresponde a la mínima bajo la cual se considera que los sismos no contribuyen al nivel de movimiento cuya excedencia se evalúa.

Figura 8.1. Esquema de un análisis de completitud, donde se observan los rangos de magnitud que han sido registrados completamente. Eje izq: año de referencia para cada rango de magnitud, izq. arriba: AOC = año origen del catálogo, izq. abajo: año actual; eje der.: periodo de completitud para cada rango de magnitud (PC(m)), der. arriba: POC = periodo de observación del catálogo.

El siguiente paso dentro de la metodología propuesta, es calcular la tasa de sismos y de momento sísmico de la región. Como la magnitud momento M_w lleva asociada una incertidumbre, ésta debe ser incluida en la estimación de la tasa de momento sísmico. Para ello, y siguiendo las recomendaciones de la autora, a cada sismo se le asocia una probabilidad de que su magnitud sea una de las posibles dentro de su rango de incertidumbre, atendiendo a la función de densidad de probabilidad triangular adoptada para la magnitud. En lugar de calcular la tasa de sismicidad de una cierta magnitud, se utilizarán las tasas de sismicidad probable entorno a esa magnitud y en lugar de calcular las tasas de momento sísmico para cada magnitud registrada, se calcularán también las tasas de momento sísmico probable.

Para obtener la tasa anual de sismos registrados de cada magnitud $[\dot{n}(m)]$, se divide el número de sismos de esa magnitud entre el número de años comprendidos en su periodo de completitud PC(m):

$$\dot{n}(m) = \frac{n(m)}{PC(m)} \quad [2]$$

El momento sísmico $Mo(m)$ que se libera en cada terremoto de magnitud M_w , se puede calcular de acuerdo a la expresión propuesta por Hanks y Kanamori 1979:

$$Mo(m) = e^{\bar{c} + \bar{d}m} \quad [3]$$

Donde $\bar{c} = 16.1 \cdot \ln(10)$ y $\bar{d} = 1.5 \cdot \ln(10)$.

Multiplicando el valor de $Mo(m)$ por la tasa de sismos de esa magnitud, se obtiene la tasa de momento sísmico $\dot{Mo}(m)$ liberada en la región para dicha magnitud, según la relación publicada por Anderson (1979):

$$\dot{Mo}(m) = \dot{n}(m) \times Mo(m) \quad [4]$$

Si se suman las tasas de momento sísmico correspondientes a todas las magnitudes comprendidas entre los límites de magnitudes fijados (M_{min} , MMC), se obtiene la tasa de momento sísmico total que se libera en la región en el intervalo de magnitudes registradas de forma completa.

$$\dot{Mo}_{región[M_{min}, MMC]} = \sum_{M_{min}}^{MMC} \dot{Mo}(m) = \sum_{M_{min}}^{MMC} \dot{n}(m) \times Mo(m) \quad [5]$$

Reparto de tasas entre fallas y zonas

Para estimar la tasa de momento sísmico acumulada en la falla, en ese intervalo de magnitudes de interés, se le asocia un modelo de recurrencia y un valor de beta inicial, posteriormente ajustado según la metodología. Esta misma asignación habrá que efectuarla también en la zona, estableciendo una relación entre los valores de beta de las fallas y de la zona de una misma región y permitiendo, de este modo, fijar una de ellas y calcular la otra a partir de la primera, siempre y cuando se conserve el equilibrio del modelo.

El método supone que la forma de liberar energía de las fallas es por medio de sismos de distinta magnitud, para lo cual se hará uso de modelos de recurrencia tipo GR. La tasa de momento sísmico de la falla $\dot{Mo}$ se determina partir de la tasa de deslizamiento (*slip rate*), el

módulo de rigidez y el área de plano de falla, utilizando la expresión propuesta por (Brune 1968):

$$\dot{M}_o = \mu \times \dot{u} \times A$$

[6]

Donde μ es el módulo de rigidez o de cizalla, $\dot{u}$ la tasa de deslizamiento y A el área del plano de falla.

Esta tasa, representa la acumulación de momento sísmico anual en la falla, que será liberada por sismos desde una magnitud próxima a 0 hasta la magnitud máxima que puede generar la falla (M_{max} falla).

Las relaciones entre la tasa de momento sísmico y los modelos de recurrencia están basadas en la relación publicada por Anderson (1979), mediante la expresión:

$$\dot{M}_o = \int_{M_{min}}^{MMC} \dot{n}(m) \times Mo(m) dm$$

[7]

Asumiendo que las fallas se comportan según un modelo de recurrencia de GR-modificado, es posible obtener la tasa de sismos de magnitud mayor o igual a una mínima establecida $\dot{N}_{min}$, en función de la tasa de momento sísmico de la falla y la proporción de sismos β considerada, a partir de la ecuación deducida de la de Anderson (1975), según la expresión:

$$\dot{N}_{min} = \frac{\dot{M}_o \times (\beta - 1) (e^{-\beta(M_{min})} - e^{-\beta(M_{max})})}{\beta [e^{-\beta M_{max}} Mo(M_{max}) - e^{-\beta M_{min}} Mo(M_{min})]}$$

[8]

Donde $\dot{M}_o$ es la tasa de momento sísmico de la falla, $Mo(M_{max})$ y $Mo(M_{min})$ es el momento sísmico que se liberaría en el sismos de magnitud máxima y mínima respectivamente.

La tasa de momento sísmico total de la falla $\dot{M}_{o_{falla}}$, será igual a la suma de la tasa de momento sísmica liberada en los distintos intervalos de magnitud que se pueden considerar en ella. Es decir, la tasa de momento liberada desde la magnitud cero a la magnitud mínima de corte establecida M_{min} (correspondiente a magnitudes muy bajas), la tasa de momento liberada desde la M_{min} a la MMC (la que se requiere conocer para establecer el reparto de potencial), y la tasa de momento liberada en el intervalo contenido desde la MMC hasta la magnitud máxima esperada en la falla, la cual se corresponde con el tamaño de la falla y puede no estar contenida dentro del registro sísmico (Ilustración 2).

A partir del área del plano de falla o segmento, por medio de fórmulas empíricas (Wells y Coppersmith 1994; Stirling et al. 2002, Stirling et al., 2008, entre otras), se puede establecer la magnitud máxima que cabría esperar en la fuente en cuestión.

$$\dot{M}o_{falla} = \dot{M}o_{[M0, Mmin]} + \dot{M}o_{[Mmin, MMC]} + \dot{M}o_{[MMC, Mmaxfalla]} \quad [9]$$

Ilustración 2. Tasa de momento sísmico total de la falla

Se tiene entonces que para el intervalo de interés ($Mmin$, MMC), la tasa de momento sísmico correspondiente a la falla es:

$$\dot{M}o_{falla[Mmin, MMC]} = \int_{Mmin}^{MMC} \dot{n}(m) \times Mo(m) dm \quad [10]$$

El reparto de potencial sísmico entre las fallas y la zona se basa en dos principios fundamentales:

- La tasa de momento sísmico liberada por los sismos en una región es igual a la suma de la tasa de momento sísmico liberada por los sismos que se producen en todas las fallas contenidas en esa región, más la tasa de momento liberada por los sismos que ocurren en la zona y que no pueden ser asignados a ninguna falla, en el intervalo $[Mmin, MMC]$:

$$\dot{M}o_{región [Mmin, MMC]} = \dot{M}o_{zona [Mmin, MMC]} + \sum \dot{M}o_{falla [Mmin, MMC]} \quad [11]$$

- La tasa acumulada de sismos que se producen en una región es igual a la suma de las tasas acumuladas de sismos que se producen en todas las fallas contenidas en esa

región, más la tasa acumulada de sismos que ocurren en la zona y que no pueden ser asignados a ninguna falla, en el intervalo (M_{min}, MMC):

$$\dot{N}_{min_{región}}[M_{min}, MMC] = \dot{N}_{min_{zona}}[M_{min}, MMC] + \sum \dot{N}_{min_{falla}}[M_{min}, MMC] \quad [12]$$

Puesto que conocemos la tasa de momento sísmico de la región $\dot{M}o_{región}[M_{min}, MMC]$ (obtenida de la ecuación 3), y las tasas de momento sísmico de las fallas $\dot{M}o_{fallas}[M_{min}, MMC]$ (obtenidas con la ecuación 8), las cuales dependen del modelo de recurrencia asociado a las fallas y la β inicial considerada, a partir de la expresión 9 se puede conocer la tasa de momento sísmico que debe ser asociada a la zona ($\dot{M}o_{zona}[M_{min}, MMC]$).

Tal como se ha hecho con la falla, asignando a la zona un modelo de recurrencia se puede conocer la tasa de sismicidad de la zona. El parámetro libre que queda por determinar en la ley de recurrencia es el valor β de la zona. Para asignar ese valor, se puede proceder de varias formas.

En este caso, y siguiendo las recomendaciones de la autora, el valor del parámetro β asignado a la zona será igual al valor del parámetro β ajustado en la región por medio de la tasa de momento sísmico y de sismicidad (ajustando un modelo de recurrencia GR-modificada), por medio de la ecuación [6].

Dado que la tasa de momento sísmico de la zona depende de la tasa de momento sísmico de la región y de las fallas, y puesto que las fallas, a su vez, dependen de la β que define el modelo de recurrencia, la tasa de momento sísmico de la zona también va a depender de la β de la falla. Por lo tanto, el equilibrio del modelo depende de las pendientes de los modelos de recurrencia de la zona y las fallas. Esto se pone de manifiesto si representamos la ecuación [10] de acuerdo a las variables de las que depende cada una de las funciones, siendo $\dot{N}_{min_{zona}}$ una función f y $\dot{N}_{min_{falla}}$ una función y :

$$\dot{N}_{min_{región}}[M_{min}, MMC] = f(\dot{M}o_{falla}(\beta_{falla}), \beta_{zona})[M_{min}, MMC] + \sum y(\dot{M}o_{falla}(\beta_{falla}), \beta_{falla})[M_{min}, MMC] \quad [13]$$

Fijando la β de la zona a la de la región, la β de las fallas se obtendría directamente de la expresión [13], ajustándose para cumplir con el equilibrio del modelo de las ecuaciones [11] y [12].

Anexo B. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RESIDUOS Y CONTRASTE DE MODELOS

Teniendo en cuenta la alta sensibilidad de los resultados a los modelos de atenuación que se apliquen en la zona de estudio, la elección de los mismos tiene una importancia especial, por lo que se recomienda utilizar las últimas metodologías propuestas para el contraste de modelos con significación estadística, siempre que se cuenten con registros de una base de datos acelerométrica propia de la zona. Entre estas metodologías, destacan las propuestas por Scherbaum et al. (2004), conocido también como *método LH*, y la de Kale y Akkar (2012), por considerarse las más punteras, robustas y haber sido calibradas por los autores con datos observados en países europeos. Una nueva versión del método propuesto por Scherbaum fue publicado posteriormente en Sherbaum et al. (2009), conocido como *método LLH*. Sin embargo, se mantiene el uso de la primera por presentar más sencillez en su aplicación.

- Método de Scherbaum et al. (2004)

El método propuesto por estos autores, conocido como método LH (*Likelihood Method* o método de máxima verosimilitud), permite comprobar hasta qué punto una ecuación de movimiento fuerte GMPE, desarrollada con una base de datos concreta, puede reproducir satisfactoriamente la atenuación que reflejan los datos de movimiento fuerte de otras regiones, permitiendo establecer criterios para seleccionar los modelos que mejor se ajustan nuestra muestra de datos.

El método propone una clasificación de los modelos según su grado de adecuación a una base de datos de movimiento fuerte registrados basada en cuatro estimadores estadísticos: la mediana de residuos LH y la media, mediana y distribución estándar de la distribución de residuos normalizados z .

Estos estimadores son adimensionales y se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$z = \frac{\ln y_{\text{registro}} - \ln y_{\text{modelo}}}{\sigma_{\text{modelo}}} \quad [8-1]$$

$$LH(|z|) = \text{Erf} \left(\frac{|z|}{\sqrt{2}}, \infty \right) \quad [8-2]$$

Donde:

$\ln y_{\text{registro}}$ es el logaritmo natural del valor del parámetro del movimiento registrado, $\ln y_{\text{modelo}}$ es el logaritmo natural del valor del parámetro del movimiento predicho por el modelo, σ_{modelo} es la desviación estándar de $\ln y_{\text{modelo}}$. Erf es la función error, definida como:

$$Erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$$

[8-3]

Se definen entonces cuatro categorías en función del grado de ajuste de los datos al modelo. Estas categorías van de A a D, siendo la primera representativa de un ajuste óptimo de los datos al modelo y la última del peor ajuste. Los valores de los parámetros estadísticos que corresponden a cada categoría se muestran en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1. Definición de la clasificación de modelos de movimiento fuerte según su grado de ajuste a una cierta base de datos acelerométrica. A: mejor ajuste, D: peor ajuste.

ESTIMADOR ESTADÍSTICO	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
Media de z	< 0.25	< 0.5	< 0.75	> 0.75
Mediana de z	< 0.25	< 0.5	< 0.75	> 0.75
Desviación estándar de z	< 1.125	< 1.25	< 1.5	> 1.5
Mediana de LH	≥ 0.4	≥ 0.3	≥ 0.2	< 0.2

■ Método de Sherbaum et. al (2009)

El método LLH (Logarithmic Likelihood Method o método de máxima verosimilitud logarítmica) propone la selección de modelos basado en una metodología de máxima verosimilitud logarítmica de los datos para medir la distancia entre dos funciones continuas de densidad de probabilidad, dadas como $f(x)$ y $g(x)$. La función $f(x)$ representa la distribución de los registros observados en la base de datos. La distribución de los registros estimados se describe por $g(x)$ y se asume como una función log-normal con la mediana y la desviación estándar del GMPE considerado. La distribución de $f(x)$ no se conoce a priori y se supone que es log-normal con las mismas características de $g(x)$. Este método supone una mejora sobre el método LH (Sherbaum, 2004), por que incluye de una manera más consistente la desviación estándar de los modelos de predicción de movimiento fuerte.

Para obtener un índice de selección de modelos, esta metodología calcula la máxima verosimilitud logarítmica promedio de los modelos de predicción considerados, utilizando los registros de la muestra de datos, mediante la expresión:

$$LLH(g, x) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(g(x_i))$$

[8-4]

Donde x_i representa los registros observados para $i = 1, \dots, N$. El parámetro N es el número total de la muestra.

Un valor bajo del índice LLH indica una mejor relación entre los datos observados y los datos de movimiento estimados.

■ Metodología propuesta por Kale & Akkar (2012)

El más reciente de los tres métodos es el publicado por Kale y Akkar (2012), conocido como *método EDR* (*Euclidean Distance method* o método de distancia euclideana), donde los autores proponen una nueva metodología para el contraste de modelos existentes con datos locales, que surge como alternativa a los métodos anteriores propuestos por Scherbaum et al. (2004) y Scherbaum et al. (2009).

La metodología propuesta está basada en el uso de distancias euclidianas y pretende ser una alternativa que subsane los inconvenientes encontrados en los métodos anteriormente mencionados.

Tal y como exponen Kale y Akkar, la metodología de Scherbaum et al. 2004 presenta entre sus limitaciones una gran dependencia con el tamaño de la base de datos, muestran subjetividad a la hora de evaluar los índices de estimación de residuos, puesto que los mismos no presentan jerarquía y pueden establecer diferentes clases de ajuste para un mismo modelo, y por último, que no consideran la desviación estándar de las GMPE de una manera consistente, lo cual quiere decir que entre dos GMPE que proporcionan estimaciones medias similares, aquella que presente una sigma mayor, puede ofrecer mejores resultados al aplicar el test.

El método de Kale y Akkar (2012) pretende tener en cuenta la sigma de los movimientos estimados y medir la relación entre los datos observados y la media de los datos estimados, así como evitar que el método esté limitado al tamaño de la base de datos. El método está

basado en el concepto de distancia euclidea (*Euclidean Distance, DE*), definida como la diferencia absoluta entre los valores de aceleración observados y estimados.

$$DE^2 = \sum_{i=1}^N (p_i - q_i)^2$$

[8-5]

Esta distancia es ligeramente modificada siguiendo una serie de reglas probabilísticas básicas para tener en consideración la sigma en el análisis:

$$MDE = \sum_{j=1}^n |d_j| Pr(|D| < |d_j|)$$

[8-6]

De esta forma se considera que, para cada dato observado, la GMPE considerada puede estimar un rango de valores debido a la desviación asociada al modelo que sigue por tanto una distribución de probabilidad, evaluando de este modo las diferencias entre el valor de aceleración observado y el rango de estimaciones de aceleración para un punto individual.

Finalmente para la selección y clasificación de los modelos de movimiento fuerte más idóneos, los autores proponen tres indicadores diferentes:

$$MDE = \sum_{j=1}^n |d_j| Pr(|D| < |d_j|)$$

[8-7]

$$K = \frac{DE_{original}}{DE_{corregido}}$$

[8-8]

$$EDR = \sqrt{k \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MDE_i^2}$$

[8-9]

Donde MDE (Modified Euclidean Distance) es el estimador que tiene en cuenta la sigma de los modelos, k representa la relación entre los datos observados y los estimados por el modelo y el estimador EDR es la combinación de los dos indicadores anteriores (k, MDE). Los propios autores proporcionan el código para MATLAB para el cálculo de EDR así como Kappas y MDE normalizada.

Pequeños valores de MDE Y EDR proporcionan una mejor representación de los datos por el modelo predictivo que se está calibrando y el valor óptimo del estimador K es 1.

Ilustración 3. Índices estimadores de selección de modelos con los métodos LH, LLH y EDR, aplicados por Kale y Akkar con la base de datos de sus estudios, para diferentes modelos de atenuación de la literatura. Fuente: (Kale y Akkar, 2012).