Zubía 36 7-43 Logroño 2018

RIESGO SÍSMICO DE LA CIUDAD DE LOGROÑO*

LUIS CELORRIO BARRAGUÉ[1]

RESUMEN

Este artículo recoge parte de los resultados del proyecto de investigación "Logroño Resiliente". Este trabajo trata de contestar a la pregunta: ¿Está la ciudad de Logroño preparada para hacer frente a desastres naturales? Se ha prestado una atención especial al riesgo sísmico ya que los terremotos son los fenómenos naturales más destructivos existentes. Este estudio se aborda en las dos vertientes que componen el riesgo sísmico: la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad de las edificaciones. Por un lado, se describen los sismos que han afectado a Logroño y su entorno. Por otro lado, se analiza la vulnerabilidad sísmica de los edificios existentes en Logroño. Finalmente, se dan algunas previsiones sobre daños en edificios y daños a la población que produciría un sismo con una intensidad macrosísmica de grado VI.

Palabras clave: Peligrosidad sísmica, Terremotos, Resiliencia, Valoración de vulnerabilidad de edificios, Pérdidas humanas en terremotos, Daño en edificios.

This paper contains part of the results obtained in the research project: "Resilient Logroño". This work try to answer to the question: Is the city of Logroño prepared to face natural disasters? An especial treatment has posed in earthquakes because they are the most destructive disasters that can occur. This study deals with two aspects: seismic hazard and seismic vulnerability. In one hand, the earthquakes that have affected Logroño and its environment are described. In the other hand, existing buildings in the city are analysed to check if they are prepared to support a ground motion. Finally, the paper provides some previsions about building damages and human casualties that an earthquake with a macroseismic intensity of grade 6 could cause.

Key words: *Seismic hazard, Earthquakes, Resilience, Building vulnerability assessment, Human casualties in earthquakes, Damage in buildings.*

---

* Este trabajo ha contado con una Ayuda a la Investigación del Instituto de Estudios Riojanos de la Comunidad Autónoma de La Rioja.

Registrado el 23 de enero de 2018. Aprobado el 7 de noviembre de 2018.

1. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de La Rioja. luis.celorrio@unirioja.es.

1. INTRODUCCIÓN

El riesgo sísmico es el riesgo natural menos conocido, siendo prácticamente imposible su predicción. También es el más dañino ya que es el que más víctimas produce. Así, el terremoto de Haiti de enero de 2010 produjo 316.000 muertos, 350.000 heridos y 1.500.000 damnificados; el terremoto y posterior tsunami en el océano Índico de 2004 produjo 230.200 muertos, 125.000 heridos, 45.752 desaparecidos y 1,74 millones de desplazados. España ha sufrido recientemente el terremoto de Lorca en mayo de 2011. Aunque fue de menor magnitud que sismos anteriores ocurridos en la zona que no produjeron víctimas, se produjeron 9 víctimas mortales.

Los terremotos son de interés general debido a las graves consecuencias que tienen. Así, en la prensa local y en otros foros, ha surgido más de una vez el debate y la preocupación sobre la posibilidad de que se produjera un terremoto de cierta intensidad en La Rioja y sobre sus efectos. Este trabajo trata de responder a esta cuestión utilizando metodologías aceptadas en el ámbito de la ingeniería sismorresistente.

Para evaluar el riesgo sísmico de la ciudad de Logroño, hay que tener en cuenta dos parámetros o variables: la peligrosidad sísmica, es decir, la probabilidad de que se produzca un sismo de mayor o menor intensidad; y la vulnerabilidad de las edificaciones e infraestructuras existentes, es decir, la capacidad que tienen las estructuras de los edificios e infraestructuras en soportar la acción sísmica. En este trabajo la peligrosidad sísmica de Logroño se aborda en la sección 2, mientras que la vulnerabilidad de los edificios existentes se estudia en la sección 3. Los resultados del análisis de riesgo sísmico, es decir, la evaluación de los posibles daños, se incluyen en la sección 4. Finalmente la sección 5 recoge las conclusiones del trabajo.

2. PELIGROSIDAD SÍSMICA EN LOGROÑO Y SU ENTORNO

2.1. Sismicidad histórica

Logroño está situada en una zona con poca actividad sísmica. Sin embargo, hay que notar que está próxima a zonas más activas, debido a la existencia de fallas o regiones catalogadas como zonas sismogenéticas como los Pirineos (García-Mayordomo, J. et al., 2012). Así, en la Rioja Baja existe una serie de fallas que han provocado los sismos más importantes que han ocurrido en la región a lo largo de la historia. La actividad sísmica de esta zona parece estar relacionada con el cabalgamiento de Cameros. Este cabalgamiento se extiende a lo largo de más de 100 km de longitud. Está catalogado como Lugar de Interés Geológico (LIG) en el Inventario de LIG del Instituto Geominero de España (IELIG, 2013). Este cabalgamiento se caracteriza porque los materiales jurásicos y cretácicos (más antiguos) de la Sierra de Cameros se sitúan encima de los materiales terciarios cenozoicos de la Cuenca del Ebro (más modernos). La dirección principal de cabalgamiento es NW-SE en la parte oriental, pasando a W-E en el sector central y a NE-SW en la

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

zona occidental. En las numerosas fracturas, surgen manantiales termales como el de aguas termales al Suroeste de Arnedillo (IELIG, 2013). La Figura 1 muestra el mapa de la traza en superficie de este cabalgamiento (Muñoz-Jiménez A., 2012). Esta falla parte desde la zona de Ezcaray en la Sierra de la Demanda. Recorre, prácticamente, toda La Rioja, con mayor o menor continuidad, haciendo frontera entre la zona de valle formada por el valle del Ebro y los valles de los afluentes riojanos y la Sierra de Cameros. En la mitad este de la falla, en La Rioja Baja, la falla se localiza a unos 3.000 o 4.000 metros de profundidad. Esta es la zona en la que, históricamente, se ha producido la mayor actividad sísmica. Se ha estimado que la velocidad media de desplazamiento de este cabalgamiento es de 0,5 mm/año, es decir, 18 km en 36 millones de años (Muñoz-Jiménez y Casas-Sáinz, 1997). En la Figura 1 se observa, además, la alineación de este cabalgamiento con los epicentros de los terremotos que se han producido en esta región.

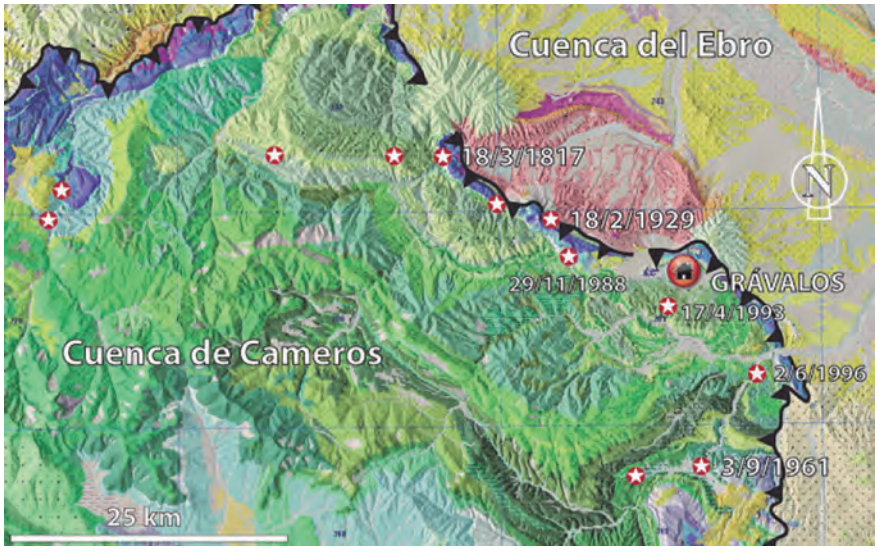


Figura 1. Mapa geológico de la Rioja Baja con la localización de los epicentros de los terremotos más importantes de los últimos 200 años. La línea negra marca la situación del cabalgamiento que separa la Cuenca de Cameros de la Cuenca del Ebro, responsable de la mayor parte de los terremotos ocurridos. (Fuente: Muñoz-Jiménez, 2012).

La Tabla 1 contiene los sismos más significativos ocurridos o, al menos de los que se tiene constancia documentada, en la zona de influencia de Logroño. La Tabla 1 es una ampliación de la existente en el blog de Antonio Aretxabala (2012). Ha sido actualizada con los sismos ocurridos hasta Mayo de 2018 registrados en el Catálogo de Terremotos del Instituto Geográfico Nacional. Se ha considerado la zona que abarca toda la Comunidad Autónoma de La Rioja y parte de las provincias de Álava y Navarra. Hay que notar que,

en la tabla solo aparecen los terremotos con intensidades mayores de IV, o con magnitudes (escala Richter) mayores que 2.5. Los temblores con magnitud inferior a 3 prácticamente no son notados por la población ya que sus efectos son similares a las vibraciones que genera un camión de gran tonelaje. Un terremoto empieza a sentirse cuando su magnitud tiene un valor entre 3.5 y 5. Entre 5 y 6, empieza a haber daños. Entre 6.1 y 6.9 los daños son severos. Con valores entre 7 y 7.9 se producen grandes colapsos en estructuras. Los terremotos que aparecen con profundidad de 0.0 son aquellos en los que no se ha podido determinar esta profundidad.

En la Tabla 1, destacamos en negrita los tres terremotos más importantes que han ocurrido en la zona de influencia de Logroño: terremoto de Arnedillo de 1817, terremoto de Turrucún de 1929 y terremoto de Aguilar del Río Alhama de 1961.

El terremoto de Arnedillo es el mayor terremoto ocurrido en La Rioja del que se conservan registros. Tuvo una intensidad VII-VIII. La escala de intensidad es la Escala Macrosísmica Europea del año 1998, abreviadamente, EMS-98 (Grünthal, 2008). Transformando este valor a valores de magnitud mediante una correlación, podemos decir que el terremoto de Arnedillo fue de una magnitud entre 5.8 y 6.9 grados en la escala Richter. La localidad más afectada fue Préjano, donde el sismo produjo el colapso del 92% de las edificaciones. No hay estadísticas de víctimas mortales ocurridas en Préjano. Sin embargo, se cree que fueron muy numerosas. Se dejó sentir en las localidades riojanas de Ausejo, Arnedo, Calahorra y Logroño. En Ausejo, unos sillares desprendidos de la parroquia sepultaron a una mujer. En Logroño no hubo víctimas mortales, sin embargo muchos vecinos abandonaron sus casas y huyeron espantados a las afueras. En cuanto a los edificios de la ciudad, se produjeron muchos agrietamientos, la bóveda y la cornisa de la iglesia de Santiago se desplomó. En la catedral de Santa María de la Redonda se arruinó una de sus capillas. (Diario La Rioja, 2017, Aretxabala 2012).

El terremoto de Arnedillo también se dejó sentir, con menor intensidad, fuera de La Rioja: Navarra, País Vasco, Aragón y Cataluña. Con mayor levedad se sintió en Santander, Palencia, Madrid, Zaragoza, Cuenca y Barcelona. Incluso el sismo se percibió en localidades de Francia (Martín-Escorza, 2005, 2006).

Los terremotos de Turruncún y Aguilar de Río Alhama causaron cuantiosos daños materiales (agrietamiento de viviendas) en las zonas próximas a los municipios, pero no causaron víctimas mortales. El terremoto de Turruncún fue investigado por el sismólogo Alfonso Rey Pastor (Rey-Pastor, 1932; Rodríguez de la Torre, 2000).

Además, de los terremotos de Arnedillo, Turruncún y Aguilar, otros terremotos con epicentros más lejanos afectaron a Logroño y, en general, a La Rioja. El famoso terremoto de Lisboa de 1755 también causó graves daños en La Rioja. Los sismólogos consideran que este temblor correspondería a una magnitud de 8.5-9 en la escala de magnitud de momento (Gutscher *et al,* 2006, USGS, 2009). Su epicentro se sitúa en el Océano Atlántico a unos 200 km al

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

suroeste del capo de San Vicente. El terremoto afectó a toda la Península Ibérica, Marruecos y Sur del Reino Unido. Se dejó sentir en varias localidades de La Rioja. Así, el sismo se sintió con intensidad V-VI en las localidades de Arnedo y Torrecilla en Cameros y con intensidad IV-V en Brieva de Cameros, Calahorra, Canales de la Sierra, Mansilla y Villanueva de Cameros (Martínez-Solares y Rodríguez de la Torre, 2001; Martínez-Solares, J.M, 2002).

Otro terremoto se dejó sentir en Logroño el 13 de Agosto de 1967. Su epicentro se situó en Arette, ciudad del Sur de Francia situada a unos 200 km de Logroño. Alcanzó en el epicentro una intensidad de VII y una magnitud de 5.5 grados en la escala Ritcher. Se dejó sentir en Vitoria, Bilbao, San Sebastián y Logroño entre otras ciudades, sin ocasionar daños personales. Según el diario ABC del 15 de Agosto de 1967, "El seísmo tuvo escasa duración en Logroño. No obstante la gente se lanzó a las calles e incluso algunas familias salieron es sus automóviles para zonas del extrarradio". El director del Observatorio Geofísico de Logroño, don Tomás Miguel Lafuente, manifestó que "en el centro se registraron además del primer movimiento, cinco réplicas de mucha menor intensidad". (ABC, 1967).

2.2. Peligrosidad sísmica en Logroño

La peligrosidad o amenaza sísmica es la mayor o menor probabilidad de que se produzca un terremoto en una localización determinada. Más formalmente, la peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un cierto valor de intensidad de movimiento del suelo producido por terremotos, en un determinado emplazamiento y durante un periodo de tiempo dado. (Benito et al, 2018). Una definición más completa fue la dada por la UNDRO (1980), según la cual la peligrosidad H (Hazard, peligrosidad en inglés) se representa por medio de la probabilidad:

$$H = P\,[x\,(s),\ x_0,\ t]$$

H es la probabilidad de que el parámetro representativo de la intensidad de movimiento, x, en un emplazamiento, s, supere un valor umbral x_0 durante un tiempo t.

Las normas de construcción sismorresistente recientes consideran como parámetro representativo la aceleración pico del terreno sobre roca o PGA (Peak Ground Acceleration). En otros casos se utilizan como parámetros representativos el desplazamiento pico del terreno (PGD), la velocidad pico del terreno (PGV) o la intensidad macrosísmica. En zonas de moderada sismicidad generalmente se usa la intensidad macrosísmica, I, como medida de peligrosidad. Además, este parámetro es más adecuado para aplicaciones de estimación de pérdidas Los mapas de peligrosidad de las normas sismorresistentes muestran la componente horizontal de PGA para un período de retorno de 475 años, que corresponde a una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años. Este es el nivel de probabilidad utilizado generalmente para el diseño de edificios sismorresistentes de importancia normal como son los edificios destinados a viviendas.

Tabla 1.

Terremotos ocurridos en La Rioja, con Magnitud mayor que 2.5 hasta Mayo de 2018.
En negrita aparecen resaltados los terremotos más significativos

Fecha	LATITUD	LONG.	PROF. (km)	INTENSIDAD	MAGNITUD	TIPO M.	LOCALIZACIÓN
18/03/1817	**42.200**	**-2.180**	**0.00**	**VII-VIII**			**ARNEDILLO**
22/03/1817	42.300	-2.250	0.00	V			ARNEDILLO
01/05/1845	42.183	-2.300	0.00	IV			MUNILLA
30/07/1846	41.967	-2.100	0.00	IV			NAVAJÚN
19/06/1869	42.150	-3.017	0.00	IV-V			CANALES DE LA SIERRA
26/03/1884	42.183	-2.300	0.00	V			MUNILLA
01/10/1885	42.183	-2.300	0.00	IV			MUNILLA
31/01/1893	42.183	-2.300	0.00	IV-V			MUNILLA
20/08/1911	42.200	-2.700	0.00	V			ALDEANUEVA DE CAMEROS
15/06/1915	42.200	-2.500	0.00	VI			CÁRDENAS
29/10/1923	42.200	-2.700	0.00	V			PRADILLO
18/02/1929	**42.133**	**-2.100**	**0.00**	**VI-VII**	**5.1**	**1**	**TURRUNCUN**
03/09/1961	**41.933**	**-2.083**	**0.00**	**VI-VII**	**4.6**	**1**	**AGUILAR RÍO ALHAMA**
12/10/1980	42.023	-2.697	80.00		2.5	2	SW VILLOSLADA DE CAMEROS
06/07/1982	42.480	-2.490	6.00		2.7	2	NW LOGROÑO
20/09/1987	42.138	-2.477	5.00	V	3.6	2	SE AJAMIL
29/11/1988	42.137	-2.183	0.00	III-IV	3.2	2	W MURO DE AGUAS

Fecha	LATITUD	LONG.	PROF. (km)	INTENSIDAD	MAGNITUD	TIPO M.	LOCALIZACIÓN
08/04/1989	42.167	-2.670	0.00		3.1	2	W VILLANUEVA DE CAMEROS
02/03/1990	42.193	-1.953	0.00		2.8	2	SE AUTOL
22/10/1990	42.232	-2.632	17.00		3.0	2	NE NIEVA DE CAMEROS
17/04/1993	42.077	-2.043	0.00		2.5	2	W IGEA
03/07/1993	42.203	-3.025	0.00		2.5	2	N CANALES DE LA SIERRA
26/08/1994	42.177	-2.200	9.00		2.6	2	SW PRÉJANO
02/06/1996	42.035	-1.992	0.00		2.6	2	NW CERVERA DEL RÍO ALHAMA
25/12/1996	42.238	-2.395	9.00		2.8	2	NE HORNILLOS DE CAMEROS
17/06/2001	42.132	-2.689	6.23	II	3.0	2	NW VILLOSLADA DE CAMEROS
30/04/2003	42.260	-2.900	0.00	III	2.5	4	SE PAZUENGOS
17/11/2003	42.059	-2.545	0.00		2.7	4	SE LUMBRERAS
14/06/2005	42.234	-2.754	10.77		2.6	4	SE ANGUIANO
31/05/2017	42.219	-2.323	12	III-IV	3.1	4	NW MUNILLA
10/04/2018	42.167	-2.224	12	II	3.1	4	NE ENCISO

Fuente: Blog de Antonio Aretxabala y Catálogo de Terremotos del IGN.

El valor de PGA para una localización dada obtenida en los mapas de peligrosidad se ha obtenido teniendo en cuenta dos de los tres factores a considerar en la evaluación de la peligrosidad: la radiación generada por la fuente y la atenuación debida a la propagación de las ondas a través de la trayectoria, desde la fuente hasta el emplazamiento. Sin embargo, el PGA no tiene en cuenta el efecto local del suelo en el emplazamiento de interés. Así, el PGA se da para terreno tipo roca. Si el suelo bajo el emplazamiento no es de tipo roca o duro hay que considerar el efecto local del suelo, que puede amplificar o amortiguar notablemente la radiación incidente en la base rocosa. El efecto local del suelo puede introducir una amplificación importante, llegando en algunos casos a multiplicar por 5 la aceleración pico, respecto a la registrada en roca, o bien aumentar en 3 grados la intensidad macrosísmica (Benito et at, 2018).

La peligrosidad sísmica asignada a Logroño en las diferentes normativas vigentes ha ido variado de unas normas a otras. Generalmente, Logroño se ha considerado como una ciudad con baja sismicidad y, por tanto, no ha sido preceptivo tener en cuenta cargas sísmicas en el proyecto de las edificaciones. La norma PGS-1/1968 vigente en el periodo 1970-1976 incluía Logroño en la zona de sismicidad media, por lo que era preciso considerar una aceleración máxima del suelo en roca firme de 0.08g, siendo g la aceleración de la gravedad (Presidencia del Gobierno, 1969). Esta misma prescripción se dio en la norma PDS-1/1974, vigente en el periodo 1977-1996 (Ministerio de Planificación del Desarrollo, 1974). Además de la obligatoriedad de considerar las cargas sísmicas, estas normas daban algunas restricciones en cuanto a tipologías constructivas: los muros de fábrica tenían que reforzarse con encadenados de hormigón o metálicos. Sin embargo, estas prescripciones ya eran de cumplimiento general, puesto que en dicho periodo no se hacían construcciones con muros no armados. Prácticamente todas las edificaciones se realizaban en base a pórticos de hormigón armado (IVE, 2016). En las normas posteriores: la NCSE-94, vigente entre 1997 y 2004, y la NCSE-2002, vigente entre 2004 y la actualidad, no se asigna peligrosidad sísmica a Logroño ya que la aceleración básica del terreno pasa a ser menor que 0.04g (Ministerio de Fomento, 1994 y 2002). Esto supone que Logroño es una ciudad con peligrosidad sísmica muy baja. En lo que respecta al proyecto estructural no es obligatorio considerar las acciones sísmicas en el proyecto de los edificios en Logroño.

En la actualidad se está desarrollando una nueva norma de construcción sismorresistente que tomará como base los mapas de peligrosidad sísmica realizados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid y publicados en "Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012" (IGN-UPM, 2013). Estos mapas se han elaborado con nuevas metodologías y herramientas y son más precisos que los anteriores en los que se basa la norma NCSE-2002. La Figura 2 representa el mapa de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 475 años. Aunque la NCSE-2002 sigue vigente. La práctica habitual actualmente consiste en utilizar el Eurocódigo 8 (UNE-EN 1998-1-1, 2010) en compañía del Anejo Nacional (AN/UNE-EN 1998-1) y de los nuevos mapas de peligrosidad sísmica.

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

Los nuevos mapas de peligrosidad sísmica suponen un cambio significativo para Logroño, ya que la peligrosidad sísmica pasará a tener un valor de aceleración pico del terreno (PGA) de 0.06g, para un periodo de retorno de 475 años tal y como se aprecia en el mapa de la Figura 2 (IGN-UPM, 2013).

El estudio de análisis de riesgo sísmico que se lleva a cabo en una sección posterior parte del valor de la peligrosidad sísmica expresada en valores de intensidad macrosísmica. La obra citada (IGN-UPM, 2013) también proporciona mapas de peligrosidad expresados en función de valores se intensidad macrosísmica. Para la construcción de estos mapas se han utilizado correlaciones para convertir los datos de PGA a intensidad. Los autores analizan las relaciones PGA-Intensidad publicadas recientemente en la literatura ya que se han ajustado con conjuntos de datos más amplios. Seleccionan dos de estas relaciones teniendo en cuenta los resultados de análisis de residuos. Así, las relaciones más adecuadas para realizar la conversión de valores de PGA a intensidad serían las de Atkinson y Kaka (2007) [AK07] y de Faenza y Michelini (2010) [FM10]. Concretamente, determinan la intensidad mediante una combinación lineal con pesos iguales de las relaciones AK07 y FM10:

$$I = 0.5 \cdot \text{AK07} + 0.5 \cdot \text{FM10}$$

donde las relaciones intensidad vs PGA son las dadas en la Tabla 2.

TABLA 2.
Evaluaciones de las relaciones Intensidad vs PGA seleccionadas

Relación	Ecuación	σ_1
AK07	$I_{MM} = 2.65 + 1.39 \cdot \log(PGA)$ para los $(PGA) \leq 1.69$ $I_{MM} = -1.91 + 4.09 \cdot \log(PGA)$ para los $(PGA) \geq 1.69$	0.89
FM10	$I_{MCS} = 1.68 + 2.58 \cdot \log(PGA)$	0.35

Fuente: IGN-UPM, 2013.

El resultado es el mapa de peligrosidad símica dado en valores de intensidad para un periodo de retorno de 475 años, mostrado en la Figura 3. Los valores obtenidos para la intensidad han sido redondeados al valor entero de intensidad más próximo. En el caso de Logroño, el valor de intensidad macrosísmica (EMS-98) para un período de retorno de 475 años es de VI.

La principal consecuencia de este aumento en la aceleración pico del terreno es que La Rioja pasará a ser considerada una comunidad con Riesgo Sísmico puesto que existen áreas con intensidades esperadas mayores e iguales que VI en el nuevo mapa de peligrosidad en valores de intensidad. El Gobierno de La Rioja, según establece la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico (Ministerio del Interior, 2010) tendrá que redactar un Plan Especial ante el Riesgo Sísmico, al igual que ya han hecho otras comunidades autónomas. La metodología utilizada en este trabajo para evaluar el riesgo sísmico de la ciudad de Logroño necesita valores de

intensidad macrosísmica. Es por ello que se considera una correlación PGA – intensidad macrosísmica para obtener los valores de la intensidad. La relación propuesta en la propuesta en (IGN-UPM, 2013).

$$I = 0.5*AK07 + 0.5*FM10$$

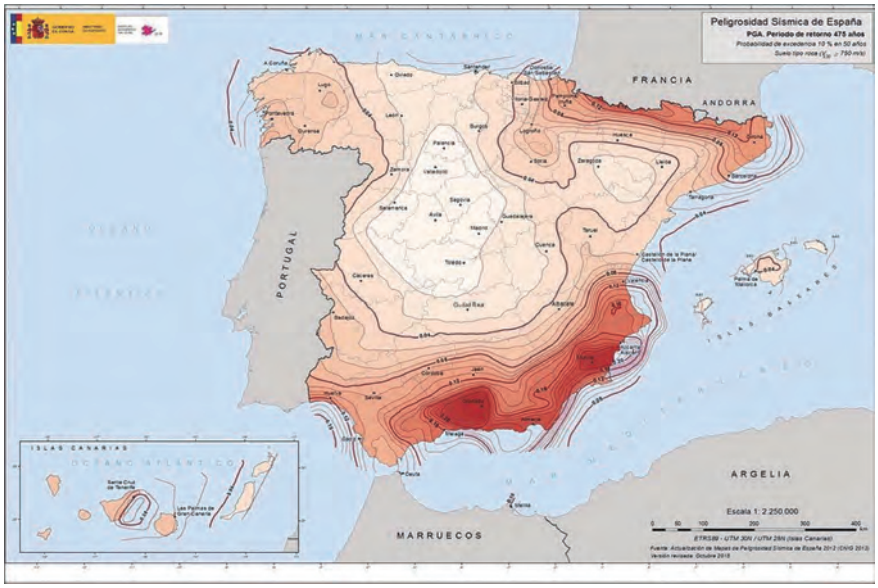


Figura 2. Mapa Actualizado de Peligrosidad Sísmica de España en valores de PGA en (g). Fuente: (IGN-UPM, 2013).

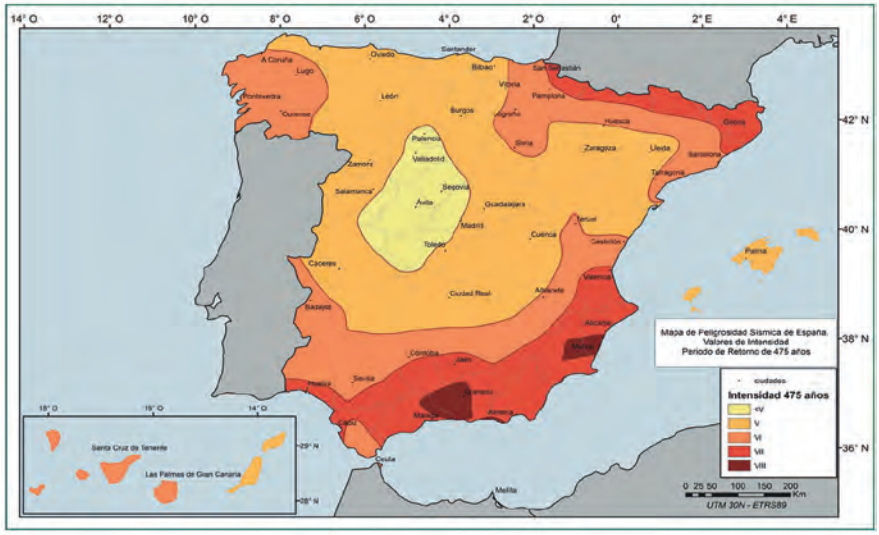


Figura 3. Mapa Actualizado de Peligrosidad Sísmica de España en valores de Intensidad (EMS-98). Fuente: (IGN-UPM, 2013).

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

2.3. Geología de Logroño

La normativa de construcción sismorresistente de estructuras establece la aplicación de coeficientes a la aceleración básica del terreno sobre suelo duro o roca con el fin de tener en cuenta el efecto local del suelo de la parcela concreta en el que se asentará el edificio a proyectar (NCSE, 2002). La caracterización local del suelo es, por tanto, fundamental para determinar las consecuencias de un terremoto sobre un edificio. En este apartado se realiza una breve introducción de la geología de Logroño tomando como principal fuente de información los mapas geológico y geoquímico elaborado para la Comunidad Autónoma de La Rioja (GR, 2005, 2005). Estos mapas están alojados en el servidor de la Infraestructura de Datos Espaciales del Gobierno de La Rioja (IDERIOJA).

En La Rioja se pueden considerar tres unidades geológicas principales:

- La Cordillera Ibérica: ocupa la mitad meridional y está formada por la sierra de la Demanda y la sierra de Cameros.
- La sierra de Cantabria, que incluye un pequeño sector del noroeste de La Rioja.
- La Depresión o Valle del Ebro.

Logroño pertenece a la unidad geológica denominada Depresión del Ebro. La Depresión del Ebro forma parte de la Cuenca del Ebro cenozoica, concretamente, es el sector más occidental de dicha cuenca. Su formación está causada por el hundimiento o subsidencia flexural que, durante la compresión terciaria, ocasionó la carga producida por el desplazamiento hacia el sur de la Cordillera Cantábrica y Pirineos, y el desplazamiento hacia el norte de la Cordillera Ibérica (GR, 2005).

El Sistema de Información Geográfica *QGIS* ha permitido elaborar varios mapas que recogen la información geológica para Logroño y su entorno, a partir de los mapas citados (GR, 2005 y 2006). La Figura 4 muestra el mapa de las estructuras geológicas y la Figura 5 muestra el mapa de los estratos.

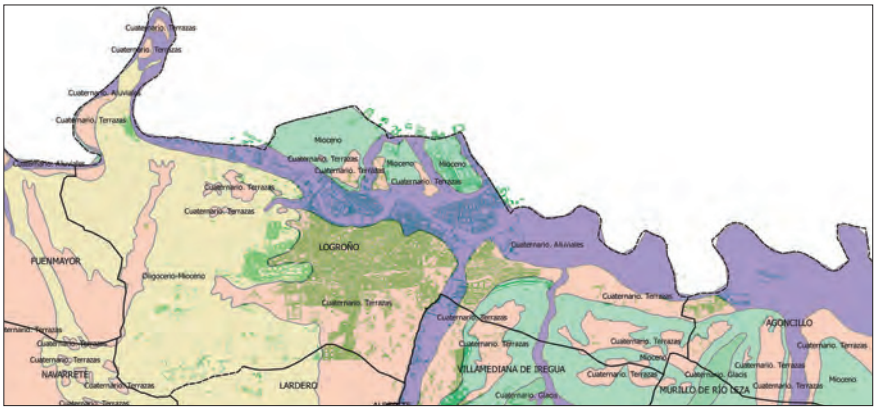


Figura 4. Mapa de Estructuras Geológicas de Logroño y su entorno. Fuente: (GR, 2005, 2006).

En el mapa de estructuras geológicas destacamos dos tipos de sedimentos cuaternarios: aluviales y terrazas. Los depósitos ligados a los cauces actuales de los ríos Ebro e Iregua son aluviales cuaternarios. Estos depósitos están constituidos fundamentalmente por gravas con matriz areno-arcillosa, arenas; limos y arcillas. Los depósitos al sur del cauce del Ebro son terrazas cuaternarias. Estas terrazas están constituidas por gravas poligénicas con cantos de distintos tamaños, subredondeados y redondeados, calizas mesozoicas y eocenas, y por areniscas y cuarcitas permotriásicas. Presentan generalmente en el techo una costra calcárea (caliche) que, a veces, alcanza 1 m. de espesor (GR, 2005, 2006). Las terrazas superiores están muy consolidadas y presentan en el techo una costra calcárea o caliche. En cambio las terrazas inferiores tienen un cemento menos coherente y con frecuencia se intercalan en ellas lentejones de arenas, limos y arcillas ricos en materia orgánica (Ayuntamiento de Logroño, 2018).

Además, en el este del término municipal de Logroño, existe una amplia zona de sedimentos terciarios (Oligoceno-Mioceno). El material de estos sedimentos está constituido por areniscas; arenas y limos. En esta zona se localizan los barrios residenciales de Valdesgastea, El Arco y Yague y otros edificios diseminados.

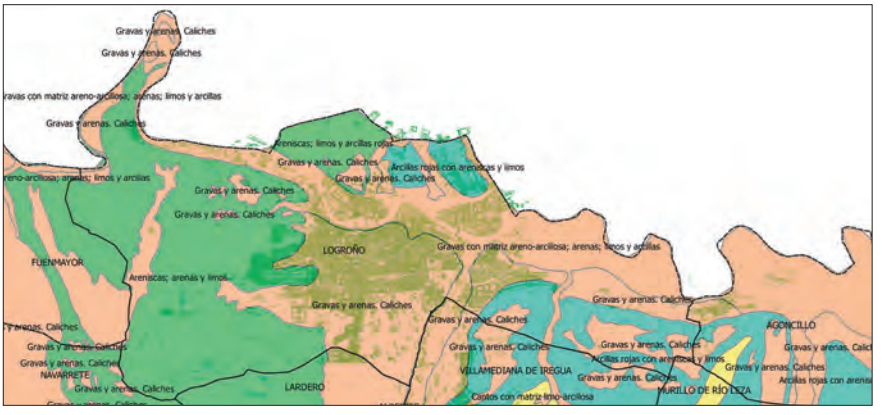


Figura 5. Mapa de Estratos de Logroño y su entorno. Fuente: (GR, 2005, 2006).

El Mapa Geológico de La Rioja (GR, 2005) también incluye un estudio de la tectónica de la región y destaca la existencia de cierta actividad geotectónica con pequeñas fallas que afectan a depósitos cuaternarios (glacis y terrazas) e incluso seísmos en la zona de contacto entre el Sistema Ibérico y la Depresión del Ebro, ya analizados en una sección anterior.

La Figura 6 muestra el mapa de estratos en el que se ha añadido la capa de la información tectónica. Aparecen contactos discordantes que marcan la separación entre estratos. Además, aparece un cabalgamiento oculto, a gran

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

profundidad, cubierto por los sedimentos terciarios (Oligoceno-Mioceno) en la zona este de la ciudad.

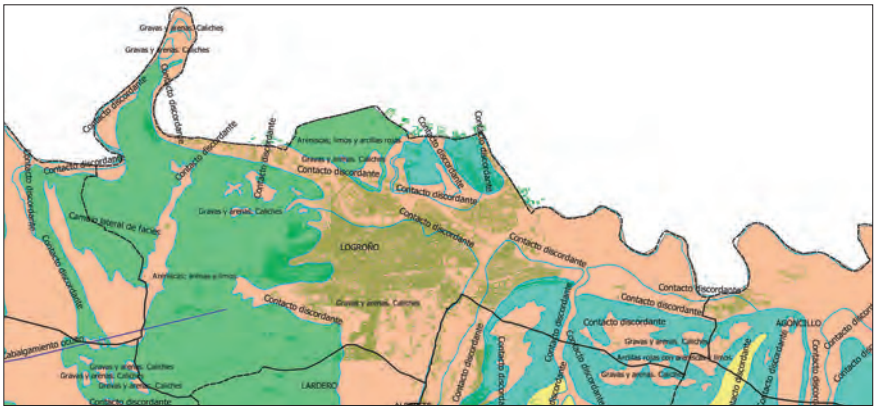


Figura 6. Mapa de características tectónicas de Logroño y su entorno. Fuente: (GR, 2005, 2006).

Podemos concluir que el núcleo urbano de Logroño, más concretamente, la zona urbana con uso residencial, se asienta prácticamente en su totalidad sobre gravas y arenas, presentando una costra calcárea o caliche. Un análisis más detallado de la influencia del factor suelo en la vulnerabilidad y riesgo sísmico requeriría de la realización de una microzonificación sísmica de la ciudad mediante costosos ensayos de campo.

3. VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LOGROÑO

Una vez conocida la peligrosidad sísmica de la ciudad, pasamos a evaluar su vulnerabilidad sísmica, como paso previo a la evaluación del riesgo sísmico. Un estudio de vulnerabilidad sísmica constituye el primer paso para la estimación y reducción del riesgo sísmico. Es también, el primer paso a realizar para el establecimiento de planes de actuación y protección en caso de ocurrencia de un terremoto. Un estudio de vulnerabilidad sísmica trata sobre el estado de los edificios e infraestructuras para hacer frente a un sismo (Benito *et al*, 2018). No podemos actuar sobre la peligrosidad sísmica natural, esta no va a cambiar. Donde sí podemos actuar con el fin de reducir el riesgo es en disminuir la vulnerabilidad de los elementos expuestos al sismo. Para ello vamos a analizar, en nuestro caso, el estado de los edificios de Logroño, especialmente los destinados a viviendas, ya que en ellos residen los logroñeses.

Existen diferentes metodologías de valoración de vulnerabilidad sísmica de edificios. Lo que hacen es analizar un conjunto de factores que caracterizan al edificio (Serrano-Lanzarote, 2014):

- Tipología constructiva.
- Ubicación del edificio.
- Diseño.
- Ejecución.
- Degradación o edad del edificio.
- Altura del edificio.

Las dos principales metodologías de valoración de la vulnerabilidad sísmica son el método de la Escala Macrosísmica Europea de 1998 o EMS-98 (Grüntal, 1998) y el método del Índice de Vulnerabilidad o Método RISK-UE-Nivel I (Milutinovic & Trendafiloski, 2003). Hill & Rossetto (2008) comparan las escalas de daño propuestas por varias metodologías de valoración de vulnerabilidad y proporcionan una guía para seleccionar una escala de daño efectiva.

La Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) establece diferentes escalas. La más conocida es la de Grados de Intensidad, que tiene en cuenta los efectos en las personas, en los objetos y los daños en los edificios. Existen doce Grados de Intensidad (desde el I hasta XII). La segunda escala que establece es la de las clases de vulnerabilidad. La EMS-98 considera 6 clases de vulnerabilidad en función del tipo de estructura del edificio. Por lo que para poder estudiar la vulnerabilidad de los edificios es fundamental el conocimiento de las tipologías constructivas existentes y la clasificación de los edificios según estas tipologías. Posteriormente se precisa la asignación de cada tipología a una clase de vulnerabilidad. Las clases de vulnerabilidad se llaman A, B, C, D, E y F y van desde la A, la más vulnerable a la F, la menos vulnerable (Barbat y Pujades, 2004).

El método de la EMS-98 asigna una clase de vulnerabilidad a cada edificio en función de su tipología edificatoria, de su antigüedad, de su ubicación geográfica, y otras características significativas, considerando el nivel de diseño sismorresistente de los edificios, es decir, el cumplimiento de normativa sismorresistente existente en el periodo de construcción. La Figura 7 muestra las clases de vulnerabilidad asignable a cada tipología constructiva. El círculo muestra la clase más probable. Así, si no existen irregularidades aparentes en un edificio, esta es la clase que se debe asignar. Una línea sólida muestra el rango probable hacia arriba o hacia abajo. Una línea punteada muestra el rango en casos extremos en los que la resistencia es particularmente extraordinaria, o la debilidad es muy severa.

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

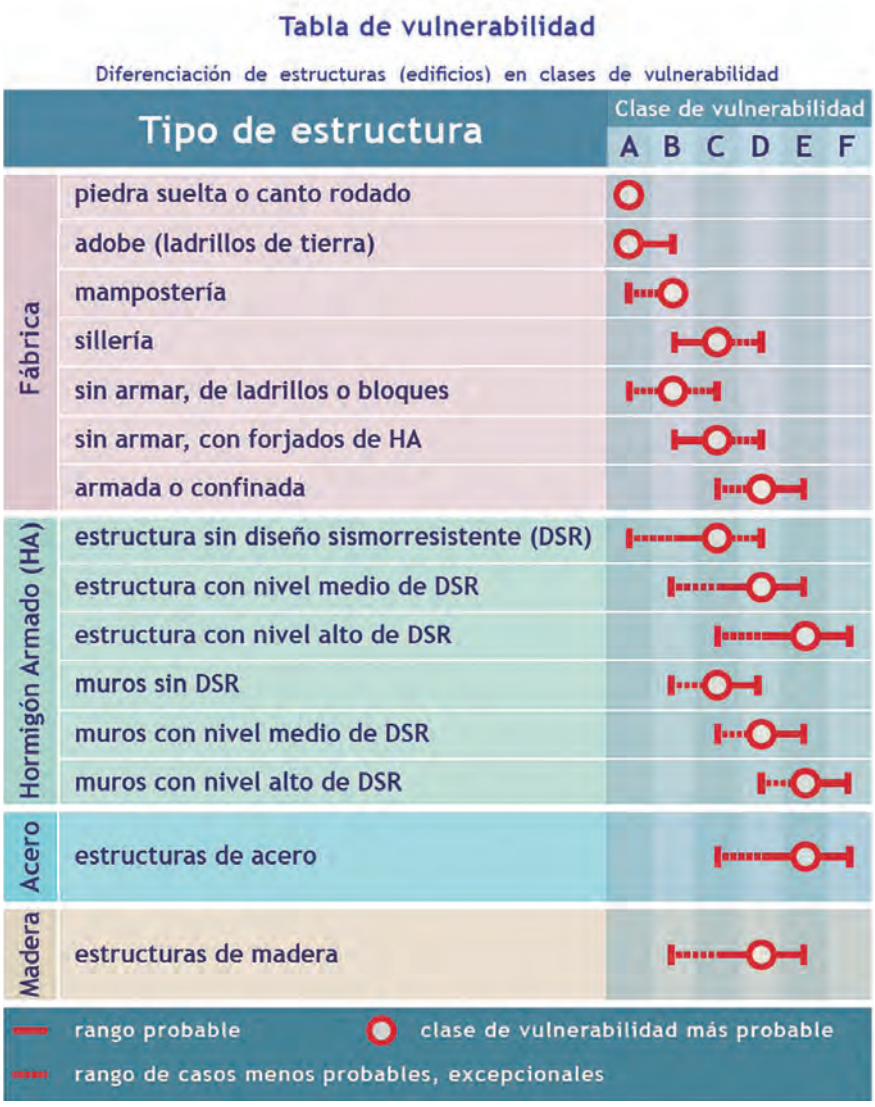


Figura 7. Clases de Vulnerabilidad según EMS-98.
Fuente: Escala de Intensidad Macrosísmica-IGN.

La EMS-98 define una clasificación de daños. Esta clasificación considera dos tipos de edificios: edificios de fábrica y edificios de estructuras de hormigón armado. Para cada tipo de edificio define 5 grados de daño.

En función de la clase de vulnerabilidad del edificio se realiza la estimación de daños. Para establecer la relación entre clase de vulnerabilidad y grado de daño se ha realizado un análisis estadístico de los daños producidos por sismos reales en áreas similares con diferentes grados de intensidad.

Los datos obtenidos utilizando estas relaciones proporcionan una estimación del riesgo sísmico. (Feriche, 2008).

En nuestro caso, para determinar la vulnerabilidad sísmica de Logroño, hay que conocer el estado de sus edificios, su antigüedad, su tipología estructural, etc. El siguiente apartado analiza los datos existentes sobre edificios de viviendas.

3.1. Datos de edificios de Logroño

Los datos utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de Logroño se han obtenido del Catastro (datos públicos), de las Bases de Datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), de la sección de Estadística del Ayuntamiento de Logroño. También se han recogido datos en campo.

El INE publica cada 10 años los Censos de Población y Viviendas. El último censo disponible en la página de Internet del INE es del año 2011. Según este censo en Logroño había 6.280 edificios y 81.724 inmuebles destinados exclusivamente a vivienda, a finales de 2011. Estas cantidades no incluyen los edificios dedicados a usos distintos a los de vivienda (industrial, comercial, administrativa) y los edificios clasificados como Patrimonio Histórico de la ciudad.

Nuestro interés se centra en los edificios destinados a viviendas puesto que los estudios de riesgo sísmico se hacen para el escenario más desfavorable, que es aquel en que un sismo tiene lugar de noche o antes de las 6 de la mañana, en día laborable de invierno, con la máxima ocupación de las viviendas (Vacareanu *et al*, 2004). Durante este periodo la práctica totalidad de la población se encuentra en sus domicilios. Por las mañanas o por las tardes, las personas están generalmente en su puesto de trabajo, en un edificio de uso administrativo o industrial, que generalmente es menos vulnerable al sismo que su propia vivienda.

La base de datos del INE proporciona información de forma agregada sobre los edificios de vivienda considerando las clasificaciones por edad del edificio y por estado de conservación: ruinoso, malo, deficiente y bueno.

La edad de los edificios es un factor muy importante en un estudio de vulnerabilidad sísmica y estimación de daños. Generalmente, los edificios de la misma época se construían con tipologías estructurales y materiales similares. Las construcciones antiguas, anteriores a 1950, se ejecutaban utilizando muros de carga no armada o mampostería. En cambio, los edificios posteriores, más modernos, se han ejecutado considerando una tipología de pórticos de hormigón armado, más adecuada para soportar terremotos. Además, se han aplicado las mejores técnicas constructivas, se han empleado materiales con mayores prestaciones y calidad, la mano de obra es más cualificada. A lo largo del tiempo, la normativa estructural ha evolucionado, con mayores niveles de exigencia y con controles de calidad más estrictos.

Las Figuras 8 y 9 reflejan el fuerte aumento que se produjo en el número de viviendas en Logroño en las décadas de los 60 y 70. En los años 60 se produjo un fuerte crecimiento de la ciudad debido, fundamentalmente, al traslado de las vías del ferrocarril de la actual Gran Vía hacia el sur, en 1958. De esta forma la ciudad dejó de estar constreñida y dio el salto hacia el sur (Ayuntamiento de Logroño, 1958).

En los años 70 el aumento continuó en gran parte debido al impulso de la actividad económica promovida por la declaración de Logroño como Polo de Promoción y Desarrollo en 1969. La población pasó de 60.000 habitantes en 1960 a unos 80.000 en 1970, llegando a ser en 1980 de 110.000 habitantes. Otro repunte de la construcción muy importante ocurre en el del período 2000 a 2008, impulsado por las modificaciones realizadas en el Plan General de Ordenación Urbana de 1985, con motivo de la entrada en vigor de la Ley 10/1998 de Ordenación del Territorio y Urbanismo de La Rioja (BOR, 1998). Estas modificaciones suponen un desarrollo polinuclear en áreas de la periferia de la ciudad. Así, se crean nuevas áreas de suelo urbano residencial, mediante la urbanización de los siguientes sectores: Madre de Dios, La Ribera, Santa Juliana (norte), Fardachón, La Guindalera, Ramblasque y La cava (sur), Los Lirios (este) y El Arco, Valdegastea y El Cubo (oeste) (Cabrerizo-Cristóbal, 2001). En 2008 estalló lo que los economistas ha llamado "la burbuja inmobiliaria". Se habían construido demasiadas viviendas en un periodo muy corto y se produjo un desequilibrio entre oferta y demanda. Las ventas de viviendas y el número de hipotecas se desplomó en un 40% en tasa interanual (Diario El Economista, 2008). Esto motivó una fuerte crisis en el sector y la actividad constructiva cayó prácticamente a cero de forma repentina.

Desde la administración pública se han impulsado diversas actuaciones. Se han llevado a cabo grandes obras de infraestructuras como el soterramiento de las vías del ferrocarril y nuevos enlaces de carreteras que permitirán una mejor comunicación de la ciudad, especialmente con los barrios del sur (Ministerio de Fomento, 2003). Las políticas de rehabilitación han permitido reconstruir muchas edificaciones en estado ruinoso o muy malo del Casco Antiguo para usos administrativos, culturales o de ocio (Centro asociado de la UNED, Colegio de Arquitectos de La Rioja, Colegio de Arquitectos Técnicos, Espacio Lagares, Centro de la Cultura del Rioja, Fundación Dialnet, hoteles, etc.).



Figura 8. Antigüedad de los edificios existentes en Logroño en 2011.
Fuente: INE.

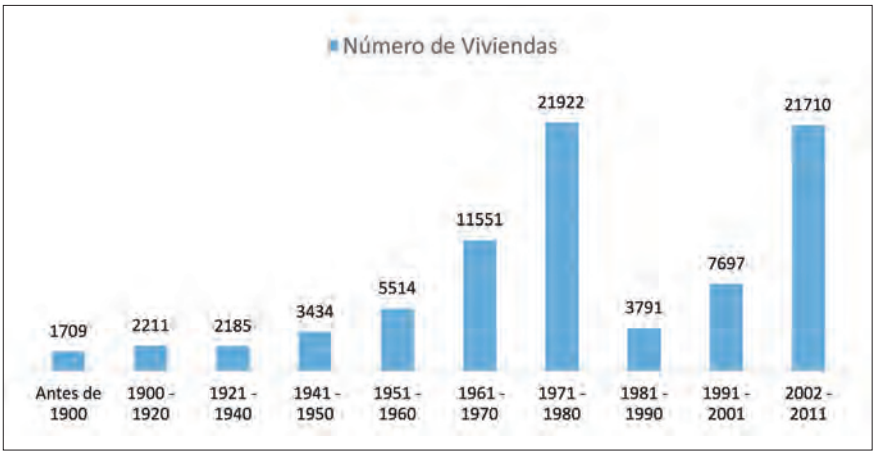


Figura 9. Antigüedad de las viviendas existentes en Logroño en 2011.
Fuente: INE.

De las Figuras 8 y 9, se deduce que el porcentaje de viviendas existentes en Logroño en 2011 y construidas con anterioridad a 1940 es de solo el 7%, que corresponden al 14% de los edificios. Por tanto, el número de edificios posteriores a 1940 es del 86%. Lo que indica que Logroño es una ciudad muy moderna. Prácticamente todos los edificios tienen estructura de pórticos de hormigón armado.

En cuanto al estado de las viviendas, según el Censo del INE del año 2011, de las 81.724 viviendas existentes en Logroño, 76.840 estaban en buen estado, 2.664 en estado deficiente, 1.898 en mal estado y 322 es estado ruinoso.

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

Tabla 3.

Número de viviendas en función del nº de plantas sobre rasante del edificio y año de construcción

LOGROÑO	TOTAL	< 1900	1900 1920	1921 1940	1941 1950	1951 1960	1961 1970	1971 1980	1981 1990	1991 2001	2002 2011
Total	81.724	1.709	2.211	2.185	3.434	5.514	11.551	21.922	3.791	7.697	21.710
1	927	42	13	24	72	262	67	30	8	237	172
2	1.289	66	43	133	145	143	101	88	112	347	111
3	1.751	152	90	72	148	94	50	143	186	357	459
4	4.959	544	235	353	418	317	262	596	265	624	1.345
5	18.423	575	724	663	932	1.790	3.147	2.623	672	1.688	5.609
6	13.946	159	574	683	588	1.089	376	2.486	370	2.314	5.307
7	12.151	724	36	123	818	647	1.421	2.648	454	1.698	3.834
8	16.790	99	96	86	111	947	3.777	8.175	894	183	2.422
9	4.651	..	..	..	17	68	950	1.664	323	213	1.416
10 o >	6.837	..	..	48	185	157	1.400	3.469	507	36	1.035

Fuente: Censo de Población y Viviendas 2011 del INE.

Otro factor que influye en la vulnerabilidad de los edificios es el número de alturas (Serrano-Lanzarote, 2014). El Censo de Población y Viviendas, clasifica los edificios y las viviendas en función del número de plantas de edificio y del año de construcción (véase Tabla 3). Podemos comprobar que los edificios de 5 a 8 plantas, construidos mediante pórticos de hormigón armado, contienen el 75% de las viviendas existentes.

Los edificios de pocas plantas (1 o 2) corresponden a viviendas unifamiliares en modernas urbanizaciones o a pequeños núcleos con características de edificación rural, como el barrio de El Cortijo.

Un aspecto a tener en cuenta en un estudio de riesgo sísmico es el grado de ocupación de las viviendas. Administrativamente, se considera que una vivienda está vacía cuando no hay habitantes empadronados en la misma. Con esta premisa, a finales de 2016 había en Logroño 61.318 viviendas habitadas y 16.789 viviendas vacías. La situación real puede ser algo distinta, pero, en general, el número de viviendas desocupadas de Logroño es muy alto. La población media por vivienda ocupada es de 2,46 habitantes.

3.2. Evaluación de la vulnerabilidad a partir de las tipologías constructivas

Para la determinación de la vulnerabilidad de los edificios se ha considerado el método de la EMS-98. Este proceso de evaluación se inicia con la propuesta de una estimación de clases de vulnerabilidad en función de las tipologías estructurales. Esta asignación se basa en la utilizada en el Plan Especial de evaluación del riesgo sísmico de la Comunidad Valenciana (Serrano-Lanzarote, 2014) y se muestra en la Tabla 4. Esta tabla incluye la práctica totalidad de tipologías estructurales existentes en los edificios de viviendas de Logroño. Sin embargo, puede ocurrir que, algún edificio concreto, debido a sus características, no pueda clasificarse dentro de los tipos propuestos. Aunque la Tabla 4 incluye la tipología de estructura de acero porticada de nudos rígidos, en Logroño prácticamente no existen edificios con este tipo de estructura. Una excepción es el edificio Torre de Logroño, situado en Gran Vía. Se trata de un "rascacielos" de 19 pisos construido en acero a principios de los años 70.

Una vez conocida la tipología estructural y el año de construcción del edificio, hay que asignar una clase de vulnerabilidad concreta de las que figuran en la última columna de la Tabla 4. Para ello, se realiza una inspección "in situ" de las características constructivas de cada edificio y se registran en una ficha o cuestionario tipo "check-list". Este cuestionario varía de una tipología a otra. La Tabla 5 muestra el cuestionario para un edificio con estructura de muros de fábrica. Estas fichas correspondientes a las tipologías consideradas son modificaciones de las del estudio del Instituto Valenciano de Edificación (Serrano-Lanzarote y Termes-Córdovez, 2015, Serrano-Lanzarote, 2014). Como el inspeccionar todos los edificios de Logroño sería una

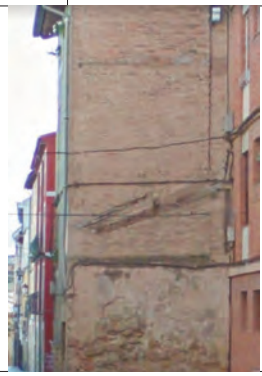
tarea ingente, se ha realizado un muestreo por tipologías y se ha determinado la clase de vulnerabilidad con los edificios de esta muestra. Los porcentajes de asignación a cada clase de vulnerabilidad para cada tipología, determinados para los edificios de la muestra se utilizan para clasificar todos los edificios de la ciudad.

Tabla 4.
Asignación de las Clases de Vulnerabilidad en función de las tipologías estructurales o constructivas

Tipología Estructural	Código	Descripción	Clases de Vulnerabilidad
Fábrica	F1	Estructura de muros de carta de piedra en seco y tapia	A
Fábrica	F2	Estructura de muros de carga de mampostería de fábrica de ladrillos macizos	A / B
Mixta	X1	Estructura mixta de mampostería de fábrica de ladrillo y pórticos de hormigón armado	A / B
Hormigón Armado	H1	Estructura porticada de hormigón armado, 1940-1970	A / B
Hormigón Armado	H2	Estructura porticada de hormigón armado, 1970-1990	B / C
Hormigón Armado	H3	Estructura porticada de hormigón armado, 1990-actualidad	C / D
Acero	A1	Estructura de acero de pórticos de nudos rígidos	C / D

Se han considerado clases de vulnerabilidad de la A hasta la D. No se han considerado clases de vulnerabilidad E o F debido a que en Logroño no hay edificios de viviendas diseñados considerando cargas sísmicas, ya que las diferentes normativas sismorresistentes españolas que se han sucedido a lo largo de la historia (PGS-1-1968, PDS-1-1974, NCSE-1994, NCSE-2002) no han obligado a ello.

Tabla 5.
Ficha para asignar la clase de vulnerabilidad a edificios de muros de fábrica de ladrillo anteriores a 1950

Tipología	**F2**		**Período**	**< 1950**	
Descripción	**Estructuras de muros de fábrica de ladrillo < 5 plantas**				
Disposición en planta	Rectangular o en I	X	Luces	Cortas, menores de 4 m	X
	Otras			Medias, entre 4 y 6 m	
Disposición de muros portantes	Paralelos	X	Nº de plantas	≤3	X
	En dos direcciones			>3	
Materiales de las piezas	Tapial		Mortero	Cal	
	Mampostería irregular			Bastardo	
	Mampostería regular			Cemento	
	Ladrillo Macizo	X	Piezas entrevigado	Tablero más mortero	
	Sillería	X		Cañizo más yeso	
Entramados de piso (forjados)	Madera natural	X		Bovedilla yeso con relleno	
	Madera aserrada	+		Bove. cerámica con relleno	
	Forjados cerámicos			Bovedillas de hormigón	
	Viguetas metálicas		Calidad de materiales y construcción	Baja	X
	Nervios “in situ”			Media	
Diseño/normas de construcción	Empírico	X		Alta	
	Reglas constructivas		Nervio enlace muro y forjado	Sí	
	Norma			No	X
Eficacia enlace entre muros	Baja	X	Rigidez forjado en su plano	Baja	X
	Media			Media	
	Alta		Diseño Sismorresistente	Nulo	X
Eficacia enlace muro-forjado	Baja	X		Medio	
	Media			Alto	
	Alta		Otros		
			Observaciones: Edificio en C/Barriocepo. Construcción tradicional, popular (no hay proyectista) de tres plantas sobre rasante. La calidad de los materiales y de la construcción es baja. Además, el edificio no sigue la alineación actual de la calle lo cual lo hace más vulnerable.		
X: probables + posible – menos probable			**Clase de vulnerabilidad EMS-98**	**A**	

Fuente: Adaptada de Serrano-Lanzarote, 2014.

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

En resumen, la asignación de la clase de vulnerabilidad sísmica sigue un método empírico, que tiene en cuenta:

- Características constructivas y tipología estructural, basadas en la época de construcción del edificio.
- Influencia de la degradación en el tiempo.
- Condiciones de rigidez de los elementos de piso.
- Nivel de aplicación de las recomendaciones constructivas del diseño sismorresistente.
- Consideración de la existencia de situaciones críticas respecto a sismo: plantas débiles, pilares cortos, pilares débiles, etc.

Como resultado de la aplicación del método de la EMS-98 se obtienen las matrices de asignación de clase de vulnerabilidad para los edificios de viviendas. Las tipologías se han simplificado a tres: muros de carga, estructuras mixtas y estructuras de pórticos de hormigón armado. Los periodos son 5. Las matrices obtenidas se muestran en las Tablas 6, 7, 8, 9 y 10.

Tabla 6.

Matriz de asignación de clase de vulnerabilidad para los edificios del período 1850-1940

Período			1850-1940		
Tipología Estructural			**Muros de Carga**	**Mixta**	**Pórticos de HA**
Porcentajes de cada Tipología Estructural			60%	40%	0%
Clase de Vulnerabilidad	A	80%	100%	50%	0%
	B	20%	0%	50%	0%
	C	0%	0%	0%	0%
	D	0%	0%	0%	0%

Tabla 7.

Matriz de asignación de clase de vulnerabilidad para los edificios del período 1940-1960

Período			1940-1960		
Tipología Estructural			**Muros de Carga**	**Mixta**	**Pórticos de HA**
Porcentajes de cada Tipología Estructural			5%	35%	60%
Clase de Vulnerabilidad	A	52.5%	100%	50%	50%
	B	47.5%	0%	50%	50%
	C	0%	0%	0%	0%
	D	0%	0%	0%	0%

Tabla 8.
Matriz de asignación de clase de vulnerabilidad para los edificios del período 1960-1970

Período			1960-1970		
Tipología Estructural			Muros de Carga	Mixta	Pórticos de HA
Porcentajes de cada Tipología Estructural			0%	25%	75%
Clase de Vulnerabilidad	A	27.5%	0%	20%	30%
	B	57.5%	0%	80%	50%
	C	15.0%	0%	0%	20%
	D	0%	0%	0%	0%

Tabla 9.
Matriz de asignación de clase de vulnerabilidad para los edificios del período 1970-1990

Período			1970-1990		
Tipología Estructural			Muros de Carga	Mixta	Pórticos de HA
Porcentajes de cada Tipología Estructural			0%	0%	100%
Clase de Vulnerabilidad	A	0.0%	0%	0%	0%
	B	35.0%	0%	0%	35%
	C	60.0%	0%	0%	60%
	D	5%	0%	0%	5%

Tabla 10.
Matriz de asignación de clase de vulnerabilidad para los edificios del período 1990-Actualidad

Período			1990-Actualidad		
Tipología Estructural			Muros de Carga	Mixta	Pórticos de HA
Porcentajes de cada Tipología Estructural			0%	0%	100%
Clase de Vulnerabilidad	A	0.0%	0%	0%	0%
	B	0.0%	0%	0%	0%
	C	80.0%	0%	0%	80%
	D	20.0%	0%	0%	20%

Aplicando los porcentajes de asignación de clases de vulnerabilidad a los edificios existentes en Logroño para cada período de antigüedad, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 11.

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | *Zubía*

Tabla 11.
Clasificación de los edificios de Logroño en Clases de Vulnerabilidad

	Clases de Vulnerabilidad de los edificios			
	A	B	C	D
Numero de Edificios	1490	1582	2694	514
% de Edificios	24%	25%	43%	8%

4. ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO

4.1. Estimación de daños en edificios de viviendas

El siguiente paso en un análisis de riesgo sísmico consiste en la estimación de los daños que producirían sismos de diferente intensidad en edificios de viviendas. Para ello se va a considerar la clasificación de daños de la EMS-98.

Los daños son función de la vulnerabilidad de la edificación y de la intensidad del sismo.

La EMS-98 considera dos clasificaciones o escalas de daños: una para construcciones de muros de fábrica y otra para construcciones de pórticos de hormigón armado. Estas tipologías son las mayoritarias en los edificios existentes en Europa. Ambas escalas van desde Grado 1 (menor daño) a Grado 5 (mayor daño). Además, estas escalas de daño diferencian entre daños estructurales y no estructurales. Para clasificar los daños en los diferentes grados se han publicado varias guías. (Feriche, 2008).

4.2. Matrices de Probabilidad de Daño

Existen diversas metodologías para la determinación de los daños causados por un terremoto. En este trabajo se adopta el método de las Matrices de Probabilidad de Daño (MPD). Este método estima los posibles daños caudados por sismos con diferentes niveles de intensidad. Los elementos de estas matrices dan la probabilidad discreta de alcanzar un grado de daño para un grado de intensidad sísmica determinado, para cada clase de vulnerabilidad. Existen diferentes propuestas de MPD, derivadas de análisis de datos de terremotos reales, o bien a partir de datos empíricos u opiniones de expertos. Destacan las MPD propuestas por la ATC (ATC-13, 1985), Braga et al. (1982, 1986) y Chávez (1998). Las MPD de Chávez se han utilizado en varios estudios de riesgo sísmico: Cataluña, Región de Murcia y Comunidad Valenciana y son las que se usan en este trabajo.

4.3. Daños en los edificios

El método de Matrices de Probabilidad de Daño permite cuantificar los daños para diferentes escenarios de riesgo. El mapa de peligrosidad sísmica

publicado de la Figura 3 da una estimación de la intensidad en cada punto de España. Esta intensidad tiene en cuenta dos de las componentes que influyen en los efectos de un sismo: la fuente y la atenuación de las ondas sísmicas a lo largo de la trayectoria. Sin embargo, esta intensidad está referida a suelo de tipo roca. Es decir, no tiene en cuenta el efecto de la amplificación del movimiento sísmico debido a los suelos blandos. El mapa asigna a Logroño un valor de intensidad macrosísmica de VI para un periodo de retorno de 475 años. Los estudios realizados en varias comunidades autónomas para la evaluación del riesgo sísmico aplican un aumento de la intensidad macrosísmica para tener en cuenta las posibles amplificaciones producidas por suelos blandos. Así, el "Mapa de zonas sísmicas considerando la amplificación del emplazamiento" de Cataluña se ha obtenido incrementando la intensidad macrosísmica en 0.5 grados para los suelos de materiales semicompactos y para suelos de material no cohesionado (ICGC, 2018). En el caso de la ciudad de Granada se ha realizado una microzonificación sísmica para tener en cuenta el efecto de sitio y se obtienen incrementos de intensidad macrosísmica de 0.2 y de 0.4 para suelos de tipos II y III, según la clasificación de la NCSE-02 (Feriche, 2008).

El efecto de amplificación del sitio se determina a partir de la V_s, velocidad de las ondas S u ondas de cortante al atravesar el terreno bajo esa localización. Según la NCSE-02, el factor de amplificación (FA) para cada tipo de terreno está determinado por la V_s media de los 30 primeros metros, $V_s{}^{30}$ (NCSE, 2002). Un análisis de riesgo sísmico que tuviera en cuenta el efecto de sitio exigiría la realización de una microzonificación sísmica de la ciudad mediante una campaña de ensayos para determinar la $V_s{}^{30}$. También es posible determinar la V_s a partir del valor de N_{spt}, la resistencia a la penetración estándar del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) expresada en número de golpeos utilizando relaciones empíricas como la de Imai (1977).

El suelo urbano de Logroño está formado por gravas y arenas de origen Cuaternario más o menos consolidadas. Por tanto, como primera aproximación se puede incluir todo el núcleo urbano en una sola zona. Así, se realizará el estudio de vulnerabilidad considerado como escenario sísmico un terremoto de intensidad macrosísmica de grado VI (6). Se obtendrían resultados más precisos de evaluación de vulnerabilidad y riesgo sísmico si se hubiera realizado una microzonificación sísmica de la zona. Para ello habría que llevar a cabo una campaña de ensayos geofísicos en distintos lugares de la ciudad con el fin de determinar la $V_s{}^{30}$. Estos trabajos quedan fuera del alcance de la investigación realizada y serían objeto de un trabajo profesional dado su alto coste económico.

A continuación se aplican las MPD a los edificios de las distintas clases de vulnerabilidad consideradas en este estudio (A a D). El grado D0 significa ningún daño y el grado D5 es el de colapso total del edificio. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12.
Edificios con daño clasificados por grado de daño, para una intensidad macrosísmica VI

CLASE DE VULNERABILIDAD	Número de edificios con daño						
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	Nº Edificios
A	311	572	422	155	28	1	1.490
B	698	620	221	40	3	0	1.582
C	1805	752	127	11	0	0	2.694
D	388	112	13	1	0	0	514
Nº Edificios	**3.202**	**2.056**	**783**	**206**	**31**	**1**	**6.280**

Agrupando los grados de daño en tres niveles de daño, identificados como daño leve (grados D0 y D1), moderado (D2 y D3) y grave (D4 y D5), se obtienen los valores de la Tabla 13.

Tabla 13.
Edificios agrupados por tres niveles de grados de daño

Nº de Edificios con daño			Porcentajes de edificios con daño		
Leve	Moderado	Grave	Leve	Moderado	Grave
5258	989	32	83.74%	15.75%	0.51%

Los daños en los edificios pueden hacer que las personas no puedan alojarse, provisionalmente o definitivamente, en sus viviendas. En los casos más graves, partes de los edificios o la totalidad de los mismos puede desplomarse y producir muertos y heridos en sus moradores. La estimación de daños en la población se determina, por tanto, en función del número de edificios que puedan verse afectados debido al sismo.

En primer lugar se ha estimado el número de edificios que podrían quedar inhabitables. Se estima, siguiendo la metodología de Coburn *et al* (1992), que quedarán inhabitables los edificios que experimenten los grados de daño 4 y 5, así como un 50% de los que resulten con grado de daño 3. Esta consideración se basa también en el miedo que pueda ocasionar a la población el verse obligada a residir en edificaciones que presenten serios daños, como por ejemplo, grandes fisuras distribuidas en los muros del edificio.

Desde un punto de vista legal se considera que, a partir de un determinado nivel de daño físico y deterioro de las instalaciones y servicios, el edificio se encuentra en condiciones ruinosas y es por tanto no apto para uso como vivienda (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1978). La declaración de ruina de un edificio es un procedimiento administrativo. Generalmente, se entiende como ruina, el estado de ruina económica. Esta se

produce cuando las obras de conservación que es necesario acometer en un inmueble para devolverlo a sus debidas condiciones de seguridad constructiva y habitabilidad superan el 50% del valor de la construcción, es decir, se considera el valor del edificio, pero no el del suelo sobre el que se asienta (González-Botija, 1996).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de edificios con daño, se obtiene para Logroño un número de viviendas inhabitables de 135, consecuencia de un sismo de intensidad macrosísmica VI (véase Tabla 14).

TABLA 14.
Edificios inhabitables debidos a un sismo con grado de intensidad macrosísmica de VI

Grado de daño	D3	D4	D5	
Nº de Edificios	206	31	1	
% Inhabitables	50%	100%	100%	TOTAL
Edificios inhabitables	103	31	1	135

4.4. Daños a la población

La población que quedaría sin hogar se determina en función del número de edificios inhabitables y la población media de cada edificio. Se toma como población media:

$$PME\ (Población\ Media\ del\ Edificio) = \frac{nº\ de\ habitantes}{nº\ de\ edificios} = \frac{153.500}{6.280} = 24,44$$

Por tanto, las personas que quedarían sin hogar debido al sismo en el caso de Logroño serían:

$$Edificios\ inhabitables * PME = 135 * 24,44 \approx 3.300\ personas$$

Aproximadamente 3.300 personas se quedarían sin hogar debido al sismo. El servicio público de emergencias tendría que prever el realojamiento provisional de estas 3.300 personas. Por ejemplo, habría que acondicionar casas de familiares, hoteles, residencias, pabellones deportivos o naves industriales para el realojo.

El daño físico a la población expuesta se estima a través de dos metodologías que han sido las que mejor se adaptan a los datos disponibles y a los objetivos de este trabajo. Estas metodologías son la desarrollada por Coburn *et al.* (1992) y la establecida en la normativa americana ATC-13 (1985).

4.4.1. Metodología de Coburn

La metodología de Coburn *et al.* (1992) solo tiene en cuenta las víctimas por colapso de los edificios, es decir, las producidas en edificios con grado

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | *Zubía*

de daño D5. No considera las víctimas causadas por otros tipos de daños en la población, dada la dificultad que supone la obtención de una expresión para la evaluación de estas otras víctimas. Otra consideración que hace esta metodología es que la actuación de los servicios de rescate está garantizada. En función de cómo sea esta actuación el número de víctimas mortales podría incluso duplicarse.

Esta metodología se resume en la expresión:

$$K_{sb} = D5 * [M_{1b} * M_{2b} * M_{3b} * (M_{4b} + M_{5b})]$$

donde:

K_{sb}, es el número de muertos por colapso de edificios.

b, es la tipología estructural del edificio.

D5, es el número de edificios que experimentan un grado de daño 5 (D5).

M_{1b}, es la población media de los edificios de la población.

M_{2b}, es el porcentaje de ocupantes del edificio en el momento de producirse el sismo.

M_{3b}, es el porcentaje de ocupantes atrapados por el colapso.

M_{4b}, es el porcentaje de muertos producidos en el momento del colapso.

M_{5b}, es el porcentaje de muertos posterior al colapso del edificio.

M_{1b}, ya se ha determinado. M_{2b}. el porcentaje de ocupantes de los edificios en el momento de ocurrir el sismo, se estimó en un 75%, que corresponde a la ocupación típica de los edificios residenciales en poblaciones urbanas, en horas nocturnas (Coburn and Spence, 2002).

En cuanto a M_{3b} se consideró que un 75% de la población estaría incapacitada para escapar del edificio; mientras que M_{4b} toma un valor del 40% (se ha dado un valor sobredimensionado, ya que se estima que en el caso de las muertes provocadas por edificios de pared de muros de piedra este coeficiente sería de un 20%).

Por último, el coeficiente M_{5b} contempla la incapacidad de los equipos de emergencia en el rescate de las víctimas. El máximo porcentaje es del 95% y corresponde a una incapacidad total de la comunidad para realizar las tareas de rescate de las víctimas debido al elevado número de ellas o a la falta de preparación. Según Coburn et al. (1992) este factor puede disminuir hasta el 45% en el caso de disponer de planes adecuados de emergencia y de que se produjese el rescate de las víctimas atrapadas en los colapsos antes de las 36 horas, con lo cual, se reduce considerablemente el número total de víctimas mortales. En este caso considerando un criterio conservador se ha tomado un valor del 95% para la ciudad de Logroño, a pesar de la experiencia de los equipos de emergencias locales en rescate de personas atrapadas en edificios. Sin embargo, no existe experiencia en rescate de personas atrapadas a consecuencia de un sismo. Hay que remarcar que los valores dados a

los coeficientes corresponden a los más desfavorables con el fin de ponernos el caso más desfavorable.

Aplicando la metodología de Coburn al caso de Logroño se obtiene:

$$K_{sb} = D5 * [M_{1b} * M_{2b} * M_{3b} * (M_{4b} + M_{5b})]$$

Sustituyendo los valores de D5 = 1.49, M_{1b} = 24.44, M_{2b} = 0.75, M_{3b} = 0.75, M_{4b} = 0.40 y M_{5b} = 0.95,

$$K_{sb} = 1.49 * [24.44 * 0.75 * 0.75 * (0.40 + 0.95)] = 27.65 \approx 28$$

Según la metodología de Coburn, se producirían 28 muertos debido exclusivamente a colapso de edificios (daño de grado D5).

4.4.2. Métodología ATC-13 (1985)

ATC es el acrónimo de Applied Technology Council, organización norteamericana que publica normas e informes sobre construcción sismorresistente. La metodología ATC-13 aporta un porcentaje de víctimas para cada grado de daño (véase la Tabla 15). El inconveniente de esta metodología es que se basa en estimaciones hechas para la tipología de viviendas del Estado de California en los Estados Unidos. A esto se ha de añadir que estos porcentajes se determinaron a partir de los daños causados por terremotos ocurridos en Estados Unidos, que suelen tener mayor intensidad que los ocurridos en España. Es importante realiza estas salvedades, ya que los resultados obtenidos con la aplicación de esta metodología no necesariamente tendrían que corresponderse con la realidad. Sin embargo, aporta información orientativa de utilidad, especialmente en los casos en los que no se dispone de otra información más fiable. La metodología ATC-13 tiene en cuenta las posibles víctimas debidas a los grados de daños más bajos, que por otro lado son los más frecuentes en lugares de sismicidad moderada.

TABLA 15.
Coeficientes de víctimas humanas en terremotos para cada grado de daño según ATC-13 (1985)

Coeficiente del Estado Físico de las Víctimas			
Grado de daño	**Heridos leves**	**Heridos graves**	**Muertos**
D1	3.3/10000	1.1/25000	1.1/100000
D2	3/1000	1/2500	1/10000
D3	3/100	1/250	1/1000
D4	3/10	1/25	1/100
D5	2/5	2/5	1/5

Núm. 36 (2018), pp. 7-43
ISSN 0213-4306 | ***Zubía***

Aplicando la metodología ATC-13 al caso de la ciudad de Logroño, para el escenario sísmico en estudio, se obtienen los resultados de la Tabla 16: 22 víctimas mortales, 75 heridos graves y 471 heridos leves.

Tabla 16.
Daños físicos en la población según la metodología de ATC-13 (1985)

Grado de Daño	Número de Edificios	Población	Heridos Leves	Heridos Graves	Muertos
D0	3.202	78.260			
D1	2.056	50.248	17	2	1
D2	783	19.127	57	8	2
D3	206	5.042	151	20	5
D4	31	769	231	31	8
D5	1	36	15	15	7
TOTALES	6.280	153.450	471	75	22

5. CONCLUSIONES

Logroño, y en general, La Rioja, tiene una sismicidad histórica importante. La falla de cabalgamiento que recorre La Rioja de este a oeste está en el origen de los terremotos más importantes que se han producido en la comunidad. Además, se han dejado sentir otros terremotos como el terremoto de Lisboa de 1755 y el de Arette (Francia) de 1967.

El nuevo mapa de Peligrosidad Sísmica elaborado por el IGN ha elevado la peligrosidad correspondiente a Logroño y su entorno. Este mapa será la base de la nueva norma sismorresistente. La Rioja tendrá que elaborar un Plan Especial frente al Riesgo Sísmico, al igual que existe en las comunidades vecinas.

Es preciso que las ciudades estén preparadas para hacer frente a riesgos naturales, es decir, que sean resilientes. Este trabajo, es una pequeña contribución a este objetivo, hacer de Logroño una ciudad más segura y resiliente frente a los terremotos.

Se ha realizado un estudio de vulnerabilidad de los edificios existentes en Logroño. Aunque la normativa no ha exigido tener en cuenta las cargas sísmicas en el proyecto de estos edificios, las tipologías, técnicas constructivas y materiales empleados siguen las recomendaciones de las construcciones sismorresistentes. Predomina la tipología estructural de pórticos de hormigón armado.

Se han estimados los daños materiales y los daños físicos en la población que causaría un sismo de intensidad macrosísmica de grado VI. Los resultados son: 131 edificios inhabitables, 3.300 personas desalojadas, 22

víctimas mortales, 75 heridos graves y 471 heridos leves. Lógicamente, estos resultados se obtienen después de realizar varias aproximaciones y simplificaciones. Sin embargo, proporcionan información cualitativa muy útil para los servicios de atención a emergencias que tienen que hacer frente a este tipo de catástrofes. Se obtendría un análisis de riesgo sísmico de mayor precisión si se realizara una microzonificación de la ciudad y se caracterizara el efecto de sitio de cada zona. Esta mejora del estudio queda como futura línea de investigación.

El trabajo realizado se ha plateado dentro de un proyecto más amplio que tiene como objetivo responder a las preguntas: ¿Es Logroño una ciudad resiliente? ¿Está la ciudad preparada para hacer frente a eventos naturales extremos? Al menos, se han obtenido respuestas cuantificables respecto al riesgo sísmico. En próximos trabajos se analizará la resiliencia de la ciudad frente a otros tipos de riesgos naturales.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este artículo agradece la ayuda del Instituto de Estudios Riojanos (IER, Consejería de Desarrollo Autonómico e Innovación del Gobierno de La Rioja) para la realización del proyecto de investigación de temática riojana “Logroño Resiliente” en su convocatoria de 2016. Además, agradece la colaboración prestada por los servicios del Ayuntamiento de Logroño, Gobierno de La Rioja y Administración General del Estado consultados durante su elaboración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC (1967). Crónica del diario ABC del 15 de Agosto de 1967. Pag 32. Madrid.

Anejo Nacional AN/UNE-EN 1998-1. Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras Sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación. Accesible en: https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/DE08DF70-CACE-4C60-9333-D4C96C75C878/142562/ANUNEEN19986partes1.pdf

Aretxabala, A. (2012) Sismicidad en La Rioja, paraíso de la geología. Blog personal. http://antonioaretxabala.blogspot.com.es/2012/05/sismicidad-en-la-rioja-paraiso-de-la.html

Aretxabala, A. (2012b). Sismicidad en los Pirineos occidentales, Álava, Guipúzcoa y Navarra. Blog personal: http://antonioaretxabala.blogspot.com.es/2012/02/sismicidad-en-los-pirineos-occidentales.html

ATC-13. (1985). ATC-13. Earthquake Damage Evaluation Data for California. Applied Technology Council. Federal Emergency Management Agency. (FEMA). California, Estados Unidos de América.

Atkinson, G. M. y Kaka, S.I. (2007). Relationships between felt intensity and instrumental ground motion in the central United States and California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, pp, 497-510.

Ayuntamiento de Logroño (1958). Plan General de Logroño. 1985.

Ayuntamiento de Logroño (2018). Accesible en: http://www.xn—logroo-0wa.es/wps/portal/web/inicio/unidadesMunicipales/urbanismo/ciudad-Territorio/

Barbat, A., Pujades, L. (2004). Evaluación de la Vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. *Sísmica 2004: 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*, p. 229-252. 2004. Guimarães, 14, 15 de Abril 2004.

Benito, B., Jiménez, Mª E., Cabañas, L. Navas, L. (2018). Curso MOOC: *Estructuras Sismorresistentes*. Edición 1. Módulo 8: Peligrosidad y riesgo sísmico. Departamento de Estructuras y Física de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid. 2018

Braga, F. Dolce, M. Liberatore, D. (1982). A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale. *Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering*, Atenas.

Braga, F. Dolce, M. Fabrizi, C. Liberatore, D. (1986). Evaluation of a conventionally defined vulnerability of buildings based on surveyed damage data. *Proceeding 9th European Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa.

Cabrerizo-Cristóbal, A. (2001). La Planificación del crecimiento urbano de Logroño. *Revista Berceo* 141, 85-114. Instituto de Estudios Riojano. Logroño.

Chávez, J. (1998). *Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: aplicación a Cataluña* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

Coburn, A. and Spece, R. Earthquake Protection, 2nd Edition. Andrew Coburn, Robin Spence. ISBN: 978-0-470-84923-1. Sep 2002. Wiley.

Coburn, A. W., Spence, R.J.S. y Pomonis, A. (1992). Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse. *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering,* p. 5.989-5.994. Balkema, Rotterdam 1992

Comunidad Valenciana (2011). DECRETO 44/2011, de 29 de abril, del Consell, por el que aprueba el Plan Especial frente al Riesgo Sísmico en la Comunitat Valenciana. (DOGV núm. 6512 de 03.05.2011).

Diario El Economista (2008). La venta de viviendas y el número de hipotecas se desploman un 40%. Artículo publicado el 28 de Mayo de 2008. Accesible en http://www.eleconomista.es/economia/noticias/563660/05/08/La-venta-de-viviendas-y-el-numero-de-hipotecas-se-desploman-un-40.html

Diario El País (2008). El mercado inmobiliario se desploma. Artículo en diario El País del 27 de Marzo de 2008. Accesible en: https://elpais.com/diario/2008/03/27/economia/1206572404_850215.html

Diario La Rioja (2017). Marcelino Izquierdo. La Rioja tembló hace 200 años. Publicado en el diario *La Rioja* el 20/03/2017.

Faenza, L. y Michelini, A. (2010). Regression analysis if MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in Shake-Map. *Geophys. J. Int.*, 180, pp. 1.138-1.152.

Feriche Fenández-Castanys, M. (2008). Daños sísmicos en construcciones y su clasificación en la EMS-98. Jornadas Formativas de Inspección y Clasificación de edificios afectados por un terremoto. Granada.

García-Mayordomo, J. et al. (2012). Modelo de Zonas Sismogénicas para el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en España. En: *Seismogenic source-zones model for the calculation of seismic hazard in Spain.* Instituto Geológico y Minero de España. 7ª Asamblea Hispano-Portuguesa De Geodesia Y Geofísica. Donostia-San Sebastián, p. 1-5.

GR (2005). Gobierno de La Rioja. Elaboración del Mapa Geológico de La Rioja. escala 1:200.000 GEOMARE S.A.L. Geotecnología, Medioambiente y Recursos. Diciembre 2005. http://www.larioja.org/territorio/es/minas/jornadas-estudios-publicaciones-tecnicas/elaboracion-mapa-geologico-rioja

GR (2006). Gobierno de La Rioja. Mapa Geoquímico de La Rioja, CRN Consultores independientes en gestión de recursos naturales S.A. Diciembre de 2006. http://www.larioja.org/territorio/es/minas/jornadas-estudios-publicaciones-tecnicas/mapa-geoquimico-rioja

González-Botija, F., 1996. La declaración de ruina económica en el derecho administrativo español. Revista de Administración Pública. Núm. 141, 1996, pp. 167-196.

Grünthal, G (2008). Escala Macrosísmica Europea 1998, EMS-98. Edición española F. Lorenzo Martín. *Consejo de Europa.* Hamburgo.

Gutscher, M.-A.; Baptista M.A. & Miranda J.M.; Miranda, J.M. (2006). "The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 2): Constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by tsunami modelling and seismic intensity". *Tectonophysics.* 426: 153-166. 2006. doi:10.1016/j.tecto.2006.02.025.

Hill, M. & Rossetto, T. (2008). Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modelling in Europe. *Bull Earthquake Eng* 6: 335. https://doi.org/10.1007/s10518-007-9057-y

ICGC (2018). Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Mapa de zonas sísmicas considerando la amplificación del emplazamiento. Accesible en http://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Descargas/Cartografia-geologica-y-geotematica/Mapas-geofisicos-y-sismicos

IDERIOJA (2018). Infraestructuras de Datos Espaciales del Gobierno de La Rioja. https://www.iderioja.larioja.org/

IELIG (2013). Inventario de Lugares de Interés Geológico. IB004 Cabalgamiento Cenozoico de Cameros. Fecha de creación de la ficha: 31/12/2013. http://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?codigo=IB004

IGN-UPM (2013). Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012. Editorial *Centro Nacional de Información Geográfica*. 2013. Madrid. ISBN:978-84-416-2685-0, 267 p.

Imai, T. (1977) P and S wave velocities of the ground in Japan. *Proceeding of IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2, 127-132.

IVE (2016). Catálogo de tipología edificatoria residencial. Ámbito España. IVE Instituto Valenciano de Edificación. 2016. ISBN: 978-84-96602-87-8.

Martín-Escorza, C. (2005). El sismo de 18 de Marzo de 1817 en La Rioja. *Kalakorikos: Revista para el estudio, defensa, protección y divulgación del patrimonio histórico, artístico y cultural de Calahorra y su entorno*, ISSN 1137-0572, nº 10, págs. 327-334.

Martín-Escorza, C. (2006). El gran terremoto de 1755, el de Lisboa, en la zona de La Rioja y regiones próximas. *Kalakorikos: Revista para el estudio, defensa, protección y divulgación del patrimonio histórico, artístico y cultural de Calahorra y su entorno*, ISSN 1137-0572, Nº 11, págs. 235-246.

Martínez-Solares, J.M. (2002). Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a.C.-1900). *Dirección General del Instituto Geográfico Nacional*. Madrid.

Martínez-Solares, J.M. y Rodríguez de la Torre, F (2001). Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755). *Dirección General del Instituto Geográfico Nacional*. Madrid.

Ministerio de Fomento (2002). NCSE-02: Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación. Real Decreto 997/2002, por el que se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02). BOE núm. 244, de 11 octubre 2002. Madrid.

Ministerio de Fomento, 2003. RESOLUCIÓN de 20 de marzo de 2003, de la Secretaría de Estado de Infraestructuras, por la que se dispone la publicación de un Convenio general entre el Ministerio de Fomento, la Comunidad Autónoma de La Rioja, el Ayuntamiento de Logroño y Renfe para la integración del ferrocarril en la ciudad de Logroño. BOE 30/05/2003.

Ministerio de Obras Públicas (1994). Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-94). Real Decreto 2543/1994, de 29 de diciembre. BOE núm. 33, de 8 de febrero de 1995, páginas 3.935 a 3.980. *Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente*. Madrid

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1978). Real Decreto 2187/1978, de 23 de junio, por el que se establece el Reglamento de disciplina ur-

banística. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo «BOE» núm. 223, de 18 de septiembre de 1978.

Ministerio de Planificación del Desarrollo (1974, 21 de noviembre). Decreto 3209/1974, de 30 de agosto de 1974, por el que se aprueba la PDS-1-1974 Norma Sismorresistente: parte A. *Boletín Oficial del Estado*, nº 279, pp. 23585-23601. Madrid.

Ministerio del Interior (2010). Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico. Resolución de 29 de marzo de 2010, de la Subsecretaría, por la que se publica el Acuerdo de Consejo de Ministros de 26 de marzo de 2010, por el que se aprueba el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico. BOE núm. 86, de 9 de abril de 2010, páginas 32.062 a 32.099.

Muñoz-Jiménez, A., and Casas-Sáinz, A. M., (1997). The Rioja Trough (N Spain): tectosedimentary evolution of a symmetric foreland basin. *Basin Research*, 9 (1): 65-85.

Muñoz-Jiménez, A (2012). Geolodía 12, La Rioja. Grávalos: Terremotos, volcanes, minerales y aguas. *Tríptico con motivo del Geolodía en La Rioja celebrado el 5 de mayo de 2012*. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza.

Presidencia del Gobierno (1969, 4 de febrero). Decreto 106/1969, de 16 de enero de 1969, por el que se aprueba la PGS-1-1968 Norma Sismorresistente: parte A. *Boletín Oficial del Estado,* nº 30, pp. 1.658-1.675.

Rey-Pastor, A. (1932). El Sismo De La Rioja Baja Del 18-2-1929. Estación Sismológica De Toledo. *Boletín De La Sociedad Española De Historia Natural*. Toledo. Imp. de Justo Torres. 1932. 4º. 10 págs. con 3 figuras + 1 plano plegado.

RISK-UE, 2003. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns (RISK-UE). WP4: Vulnerability of current buildings. Milutinovic, Z. V. y Trendafiloski, G. S. Contract No.EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. 109 pp.

Rodríguez de la Torre, F. (2000). *Bibliografía del Sismólogo Alfonso Rey Pastor (1890-1959)*. Instituto de Estudios Riojanos.

Serrano-Lanzarote, B (2014). Estudio de Vulnerabilidad Sísmica de los Edificios de la Comunidad Valenciana. Instituto Valenciano de la Edificación. Valencia. Conferencia alojada en Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=EWu5l2Vs_HU&t=1331s

Serrano-Lazarote, B. y Temes-Córdovez, R. (2015). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de los edificios residenciales estudiados dentro del Plan Especial de evaluación del riesgo sísmico en la Comunidad Valenciana. Informes de la Construcción. Vol 67, No 539. doi: http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.182, pp. 1-11.

SISMICAT, 2014. Pla d·Emergència Sísmica de Catalunya (SISMICAT). Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya Núm. 6729 - 16.10.2014

SISMIMUR, 2006. Plan Especial de Protección Civil ante el Riego Sísmico en la Región de Murcia (SISMIMUR). Accesible en la dirección: http://www.112rm.com/dgsce/planes/sismimur-home.php

UNDRO (1980). Natural disasters and vulnerability analysis. Report Expert Group Meeting, Geneva, 49 pp.

UNE-EN 1998-1-1. Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación. AENOR. 2011.

USGS (2009). Historic Earthquakes – Lisbon, Portugal. U.S. Geological Survey. 2009.

Vacareanu, R., Lungu, D., Aldea, A. and Arion, C. (2004). *Seismic scenarios handbook*. RISK-UE LM1 (2004). 50 páginas.