

Programme opérationnel Interreg IVA France-Espagne-Andorre 2007 – 2013



SISPYR

Sistema de Información Sísmica del Pirineo Système d'Information Sismique des Pyrénées Sistema d'Informació Sísmica dels Pirineus

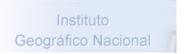
Riesgo sísmico de los edificios especiales de Val d'Aran y de los centros educativos de la provincia de Girona Acción 4.2













Main contributor: IGC 2013-04-22

	SISPYR / Interreg IVA
Authors: J. Irizarry ¹ , J. Valcárcel ³ , X. Goula ¹ y A. Bosch ¹	
Keywords: riesgo sísmico, seguridad sísmica, edificios esenciales, Val d'Aran, efecto de suelos, operacional, seguridad de la vida, co espectro de capacidad	

- IGC, Institut Geològic de Catalunya
 OMP, Université Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées
 UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
 IGN, Instituto Geografico Nacional

- 5. BRGM

Índice

1	Intro	ducció	ón	11
	1.1	Ante	cedentes	11
	1.2	Objet	ivos	12
	1.3	Alcar	ice	14
2	Met	odolog	ía para la evaluación de la seguridad sísmica	15
	2.1	Introd	lucción	15
	2.2	Form	ulario para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica	16
	2.3	Méto	do del Espectro de Capacidad	19
	2.4	Estim	ación del daño: evaluación de las curvas de fragilidad	20
	2.5	Estim	ación de las matrices de probabilidad y del grado de daño medio	22
	2.6	Verifi	cación de los niveles de comportamiento	23
	2.7	Estim	ación del índice de pérdida económica	24
	2.8	Estim	ación del índice de funcionalidad y del tiempo de recuperación	28
3	Eva	luaciór	n de la demanda sísmica en Cataluña	31
	3.1	Introd	lucción	31
	3.2	Espe	ctros de probabilidad uniforme	31
	3.3	Cara	cterización del efecto del suelo	33
	3.4	Adap	tación de los espectros probabilistas a espectros normativos	36
	,	3.4.1	Ajuste de la meseta de aceleración constante	38
	,	3.4.2	Normalización a la aceleración pico del terreno del PSHA	40
4	Ejer	nplo d	e la evaluación de la seguridad sísmica	43
	4.1	Introd	lucción	43
	4.2	Pelig	rosidad sísmica que afecta al Espitau de Val d'Aran	44
	4.3	Cara	cterización de los suelos y peligrosidad local	45
	4.4	Espita	au de Val d'Aran	46
	4.5	Deter	minación del punto de capacidad por demanda	47
	4.6	Deter	minación de la matriz de probabilidad de daño	49
	4.7	Evalu	ación de la seguridad sísmica según criterios del Comité Visión 2000	51
	4.8	Índice	e de pérdida económica, índice de funcionalidad económica y tiempo	de
	recu	peraci	ón	51
5	Eva	luaciór	n de la seguridad sísmica de los edificios de especial importancia de	Val
	d'Ar	an		55
	5.1	Introd	lucción	55

	5.2 Edificios de especial importancia de Val d'Aran	56
	5.3 Descripción del conjunto de edificios de especial importancia de Val d'A	ran 58
	5.3.1 Tipologia estructural	58
	5.3.2 Periodo de Construcción	58
	5.3.3 Número de Plantas	60
	5.3.4 Irregularidad en planta y altura	61
	5.3.5 Otros detalles estructurales	62
	5.3.6 Tipo de uso	62
	5.4 Peligrosidad sísmica	64
	5.5 Evaluación del grado de daño medio	66
	5.6 Evaluación de la seguridad sísmica	67
	5.7 Evaluación del índice de pérdida económica	71
	5.8 Evaluación del índice de funcionalidad	72
	5.9 Evaluación del índice de recuperación	72
	5.10 Resumen y discusión	73
6	Evaluación de la seguridad sísmica de centros educativos de la provir	icia de
	Girona	79
	6.1 Introducción	79
	6.2 Centros escolares de las capitales de la provincia de Girona	79
	6.2.1 Tipologia estructural	81
	6.2.2 Periodo de Construcción	81
	6.2.3 Número de Plantas	82
	6.3 Peligrosidad sísmica	83
	6.4 Evaluación del grado de daño medio de los centros escolares	86
	6.5 Evaluación de la seguridad sísmica	89
	6.6 Evaluación del índice de pérdida económica	94
	6.7 Evaluación del índice de funcionalidad	98
	6.8 Evaluación del tiempo de recuperación	102
	6.9 Resumen y discusión	107
7	Conclusiones	111
	7.1 Introducción	111
	7.2 Seguridad Sísmica	112
	7.3 Metodología para la evaluación de la seguridad sísmica y de los	daños
	esperados en edificios de especial importancia	113
	7.3.1 Los edificios	114
	7.3.2 La acción sísmica	114

7	7.3.3	Daños,	pérdidas	económicas,	funcior	nalidad	У	de	tiem	pos	de
r	ecupe	eración								1	115
7.4	Segu	ıridad sísı	mica de ed	dificios de impo	ortancia e	especial	en	la co	marca	a de '	Val
d'Ara	an									1	116
7.5	Segu	ıridad sís	mica de ui	n conjunto de	centros	educativ	os/	de la	prov	íncia	de
Giror	na									1	118
Referen	cias									1	121
Anexos										1	125
Anex	ко А:	Formula	rios para	la evaluació	n de la	vulnei	rabil	idad	de	edific	ios
		esencial	es								
Anex	ко В:	Parámet	ros de los	espectros de	capacidad	d y curv	as o	de fra	gilida	d de	las
		tipología	s estructur	ales							

Lista de Figuras

Figura 1. Cálculo del punto de capacidad por demanda y del espectro de demanda (Valcárcel, 2013).
Figura 2. Curvas de fragilidad de la tipología estructural RC1M.
Figura 3. Funciones de pertenencia adoptadas por Valcárcel (2013) para la evaluación del índice de pérdida económica.
Figura 4. Índices de pérdida económica y grado de daño medio (normalizado [0,1]) obtenidos por Valcárcel (2013) para un edificio de la tipología RC3.2L. Uso de espectros del EC8 tipo II en roca firme.
Figura 5. Índice de pérdida y grado de daño medio normalizado [0,1]. Edificio de la tipología RC3.2L. Uso de espectros del EC8 tipo II en roca firme.
Figura 6. Índice de funcionalidad y tiempo de recuperación según el grado de daño medio normalizado.
Figura 7. Valores medios de la aceleración pico del terreno (PGA) para un periodo de retorno (Tr) de 475 años (GEOTER, 2008).
Figura 8. Mapa de la mesozonación sísmica de Cataluña (IGC, 2011).
Figura 9. Tipos de suelos considerados en la mesozonación sísmica de Cataluña (IGC, 2011).
Figura 10. Espectros de respuesta de aceleración (normalizados) propuestos para cada tipo de suelo (Colas et al., 2013).
Figura 11. Espectros de respuesta elástica en roca para Vielha: espectro medio (Geoter, 2008) para Tr475 y percentiles 50 y 70 junto a varios espectros normativos con distintos escalados.
Figura 12. Error medio absoluto. Comparación con espectros EC 8 Tipo II escalados al PGA y ajustados en la meseta de aceleración constante (Tr 475 años, valores medios).
Figura 13. Razón entre la aceleración máxima y el PGA, normalizada al valor 2.5 (Tr 475 años, valores medios)
Figura 14. Error medio absoluto. Comparación entre espectros del EC 8 Tipo II y los espectros del PSHA para periodos de retorno de 975 años (valores medios). 41
Figura 15. Razón entre el PGA obtenido para periodos de retorno de 975 y 475 años (valores medios).
Figura 16. Ubicación del Espitau de Val d'Aran. 43
Figura 17. Espectro de respuesta de aceleración obtenidos por GEOTER (2008) para Val d'Aran.
Figura 18. Espectro de demanda ajustado para el Hospital de Val d'Aran. 44
Figura 19. Localización de los edificios del Espitau en la mesozonación sísmica de Cataluña.
Figura 20. Espectro de demanda ajustado para el Hospital de Val d'Aran con efectos de suelo.

Figura 21. Fachadas del Espitau (a y b); Pilares (c) y forjado (d) de la estructua (Valcárcel, 2013).	ra 17
Figura 22. Curvas de capacidad de los edificios que forman el Espitau de Val d'Ara	n. 18
Figura 24. Determinación del punto de capacidad por demanda: Espitau.	18
Figura 25. Determinación de las probabilidades de daño del edificio principal d Espitau.	le 19
Figura 26. Probabilidad de daño de los edificios del Espitau para un periodo de 47 años.	75 50
Figura 27. Aplicación de los criterios de seguridad sísmica del Comité Visión 2000. 5	51
,	de 52
, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	de 53
Figura 30. Situación de la comarca de Val d'Aran.	55
Figura 31. Mapa de aceleraciones máximas para un período de retorno de 475 año (Geoter, 2008).	os 56
Figura 32. Ubicación de los edificios de especial importancia.	57
Figura 33. Distribución municipal de los edificios de especial importancia.	58
Figura 34. Distribución de los edificios de especial importancia según su tipolog estructural.	ía 59
Figura 35. Distribución de los edificios de especial importancia según su tipolog estructural y el periodo de construcción.	ía 80
Figura 36. Distribución de los edificios de especial importancia según el número o plantas.	de 31
Figura 37. Distribución de los edificios de especial importancia según (a) irregularidad en altura y (b) la irregularidad en planta.	la 31
Figura 38. Distribución de los edificios de especial importancia según su uso.	3
Figura 39. Distribución de los edificios de especial importancia según su tipología uso.	у 54
Figura 40. Distribución de los edificios de especial importancia según periodo o construcción y su uso.	de 34
Figura 41. Mesozonación sísmica de la Val d'Aran.	35
Figura 42. Distribución de los edificios de importancia especial de la comarca según clase de suelo donde están situados.	la 35
Figura 43. Distribución de los edificios de importancia especial de la comarca según tipo de suelo y el rango de PGA con efectos de suelo para los periodos de retorno de 475 y 975 años.	
Figura 44. Distribución de los edificios de importancia especial de la comarca según daño esperado para los periodos de retorno de 475 y 975 años.	e 37
Figura 45. Grado de daño medio para los periodos de retorno de 475 años.	8
Figura 46 Grado de daño medio para los periodos de retorno de 975 años	39

Figura 47. Grado de daño medio de los edificios de especial importancia según su uso para los periodos de retorno de 475 años y el criterio Operacional.

Figura 48. Grado de daño medio de los edificios de especial importancia según su uso para los periodos de retorno de 975 años y el criterio Seguridad de la Vida. 71

Figura 49. Índice de pérdida económica estimado para cada edificio de especial importancia según los periodos de retorno de 475 y 975 años. 73

Figura 50. Índice de funcionalidad estimado para cada edificio de especial importancia según los periodos de retorno de 475 y 975 años.

Figura 51. Índice de recuperación estimado (días) para cada edificio de especial importancia según los periodos de retorno de 475 y 975 años. 75

Figura 52. Situación de la provincia de Girona.

_ _

Figura 53. Distribución municipal de los centros escolares estudiados.

81

79

Figura 54. Distribución de los edificios de los centros escolares según su tipología estructural.

Figura 55. Distribución de los edificios de los centros escolares según su tipología estructural y el periodo de construcción.

Figura 56. Distribución de los edificios de los centros escolares estudiados según el número de plantas.

Figura 57. Aceleraciones máximas para un período de retorno de 475 años (Geoter, 2008).

Figura 58. Mesozonación sísmica para la provincia de Girona.

84

Figura 59. Distribución de los edificios de los centros escolares seleccionados de la provincia de Girona según la clase de suelo donde están situados.

Figura 60. Distribución de los edificios de los centros escolares seleccionados según el tipo de suelo y el rango de PGA con efectos de suelo para los periodos de retorno de 475 y 975 años.

Figura 61. Distribución de los edificios de los centros escolares seleccionados de la provincia de Girona según el daño esperado para los periodos de retorno de 475 y 975 años

Figura 62. Dispersión del grado de daño medio para un periodo de retorno de 475 años de los centros escolares por municipio.

Figura 63. Dispersión del grado de daño medio para un periodo de retorno de 975 años de los centros escolares por municipio.

Figura 64. Dispersión del grado de daño medio para un periodo de retorno de 975 años de los centros escolares por municipio.

Figura 65. Aplicación del criterio de Operatividad para un periodo de retorno de 475 años (1/2).

Figura 66. Aplicación del criterio de Operatividad para un periodo de retorno de 475 años (2/2).

Figura 67. Aplicación del criterio de Seguridad de la Vida para un periodo de retorno de 975 años (1/2).

Figura 68. Aplicación del criterio de Seguridad de la Vida para un periodo de retorno de 975 años (2/2).

- Figura 69. Distribución del índice de pérdida económica de los centros escolares estudiados.
- Figura 70. Índice de pérdida económica estimado para los periodos de retorno considerados (1/2).
- Figura 71. Índice de pérdida económica estimado para los periodos de retorno considerados (2/2).
- Figura 72. Dispersión municipal del índice de pérdida económica para un periodo de retorno de 475 años. 97
- Figura 73. Dispersión municipal del índice de pérdida económica para un periodo de retorno de 975 años. 98
- Figura 74. Índice de funcionalidad estimado para los periodos de retorno considerados (1/2).
- Figura 75. Índice de funcionalidad estimado para los periodos de retorno considerados (2/2).
- Figura 76. Distribución del índice de funcionalidad de los centros escolares estudiados.
- Figura 77. Dispersión municipal del índice de funcionalidad para un periodo de retorno de 475 años.
- Figura 78. Dispersión municipal del índice de funcionalidad para un periodo de retorno de 975 años.
- Figura 79. Distribución del tiempo de recuperación de los centros escolares estudiados.
- Figura 80. Índice de recuperación (días) estimado para los periodos de retorno considerados (1/2).
- Figura 81. Índice de recuperación (días) estimado para los periodos de retorno considerados (2/2).
- Figura 82. Dispersión municipal del tiempo de recuperación para un periodo de retorno de 475 años.
- Figura 83. Dispersión municipal del tiempo de recuperación para un periodo de retorno de 975 años.

Lista de Tablas

Tabla 1. Tipologías estructurales consideradas por el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004)17
Tabla 2. Referencias recomendadas por Valcárcel (2013) para definir los parámetros de los espectros de capacidad y las curvas de fragilidad para las tipologías estructurales consideradas
Tabla 3. Rangos de altura propuestos por el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004).
Tabla 4. Criterios para definir los estados de daño según el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004)21
Tabla 5. Niveles de comportamiento esperado para edificios esenciales según el comité VISION 2000
Tabla 6. Índices de daño según diferentes escalas (Rossetto y Elnashai, 2003) 24
Tabla 7. Definición del índice de pérdida tomando un conjunto de valores aceptables según estado de daño (estructural)
Tabla 8. Niveles de comportamiento para hospitales
Tabla 9. Tiempos de recuperación propuestos en el FEMA 22729
Tabla 10. Descripción de los tipos de suelos considerados en la mesozonación de Cataluña (IGC, 2011)35
Tabla 11. Parámetros de los espectros de respuesta de aceleración propuestos por el proyecto SISPYR para cada tipo de suelo en la mesozonación de Cataluña
Tabla 12. Parámetros del espectro de capacidad de la tipología (Valcárcel, 2013) 47
Tabla 13. Coordenadas del punto de comportamiento por demanda para cada edificio del Espitau49
Tabla 14. Grado de daño medio para cada edificio del Espitau50
Tabla 15. Edificios de especial importancia de Val d'Aran57
Tabla 16. Número y porcentaje de edificios en función del su período de construcción59
Tabla 17. Edificios de los centros escolares de las capitales de la provincia de Girona80
Tabla 18. Número y porcentaje de edificios de los centros escolares de la provincia de Girona en función del su período de construcción

1 Introducción

1.1 Antecedentes

En este trabajo se adoptan y proponen metodologías para la evaluación de la seguridad y riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales, con el fin de valorar los beneficios de la mitigación del riesgo. Para ello, se definen y utilizan índices de pérdida económica y de funcionalidad, entre otros, para evaluar las pérdidas potenciales y, en consecuencia poder establecer prioridades de actuación. A su vez se desarrollan metodologías para la estimación de los efectos asociados a la interrupción de sus servicios durante emergencia, así como para valorar los impactos de los daños luego del desastre. Estas metodologías se aplican a escala local, regional, nacional y supranacional, en la evaluación de dos tipos de edificios considerados de importancia especial, como son los centros educativos y los centros de salud.

La evaluación de la seguridad sísmica de los edificios esenciales tiene tres componentes principales: 1) los niveles de peligrosidad o amenaza, 2) el comportamiento requerido de los edificios ante los niveles de peligrosidad y 3) la evaluación del comportamiento esperado de los edificios. Al respecto, el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995), definió la amenaza en términos del periodo de retorno de los eventos. A su vez describió niveles de comportamiento sísmico requeridos en términos de los daños esperados, la funcionalidad de las instalaciones y los peligros sobre la vida de los ocupantes. Estos niveles de comportamiento se especifican según la importancia de las instalaciones y los niveles de peligrosidad.

En lo que respecta a la evaluación, para verificar la seguridad de los edificios, en el documento FEMA 273 (1997) se sugieren procedimientos para evaluar su comportamiento sísmico, en los cuales se compara la capacidad de los edificios con la demanda sísmica asociada a los niveles de amenaza de interés. Siguiendo este enfoque, en el proyecto RISK UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003) se proponen metodologías para evaluar la seguridad y estimar el daño esperado. Estas metodologías han sido aplicadas para la evaluación de escenarios de daños a nivel local (Pitilakis et al. 2006, Lantada et al. 2009, Irizarry et al. 2010) y se adoptan en este

trabajo para evaluar la seguridad y estimar los daños esperados en centros educativos y de salud, los cuales son considerados como edificios esenciales.

En este trabajo se considera que la estimación de las pérdidas económicas, de la funcionalidad según el daño de los edificios, así como estimaciones de la capacidad de respuesta en situaciones de emergencia y de los impactos luego del desastre, son resultados útiles para la toma de decisiones frente a la seguridad y riesgo sísmico de los edificios esenciales.

Para estimar las pérdidas económicas, se aplica el índice propuesto por Valcárcel (2013) para calcular el porcentaje de perdida (respecto al valor del edificio), a partir de la matriz de probabilidad de daños obtenida para un evento determinado. Para evaluar la operatividad de las instalaciones durante emergencias, se aplica un índice de funcionalidad que relaciona la operatividad de los edificios en términos del daño físico sufrido, que fue desarrollado por Valcárcel (2013) siguiendo las indicaciones de los niveles de comportamiento establecidos por el comité VISION 2000 (SEAOC 1995) y en los documentos FEMA 273 (1997) y FEMA 356 (2000).

Este enfoque de la vulnerabilidad sistémica que va más allá de la vulnerabilidad estructural es de gran complejidad. Por esta razón, en este trabajo se exploran métodos simplificados de evaluación que incluyen los aspectos relacionados con la fragilidad estructural y no estructural, así como el nivel de organización para la respuesta a emergencias. Este conjunto de variables permiten identificar diferentes costos asociados a la degradación o pérdida de los edificios y sistemas esenciales, siendo útiles para priorizar el estudio detallado de las instalaciones y, si es necesario, el desarrollo de acciones y programas orientados a la reducción de la vulnerabilidad.

1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es desarrollar y aplicar metodologías avanzadas para la evaluación de la seguridad y para la priorización de la mitigación del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales. Estas metodologías se aplican a un conjunto de centros educativos públicos de la provincia de Girona y a un conjunto de edificios de especial importancia de la comarca de Val d'Aran. También se adoptan procedimientos para calificar el comportamiento sísmico de edificios y se presentan

metodologías para la estimación de las pérdidas probables considerando un conjunto de eventos sísmicos acordes con la peligrosidad sísmica de la zona de análisis.

Los objetivos específicos de este estudio son los siguientes:

- Diseñar formularios y guías para la inspección de la vulnerabilidad estructural de edificios esenciales.
- Realizar una inspección visual rápida de los edificios estudiados; clasificarlos en tipologías estructurales y asociarles los espectros de capacidad correspondientes.
- Comparar las formas espectrales del Eurocódigo 8 (EC8) (EN-1998-1, 2004)
 con los espectros de amenaza uniforme obtenidos en un estudio de peligrosidad sísmica elaborado para Cataluña, para periodos de retorno de 475 y 975 años. Identificar alternativas para simplificar el cálculo de la acción sísmica en roca firme.
- Identificar el tipo de suelo correspondiente a cada una de las instalaciones inspeccionadas, utilizando un estudio de mesozonación sísmica elaborado para Cataluña. Evaluar la acción sísmica en superficie empleando las formas espectrales especificadas para cada tipo de suelo.
- Evaluar el comportamiento sísmico de los edificios empleando el método simplificado del espectro de capacidad, considerando los espectros de capacidad de las tipologías asociadas y los espectros de demanda correspondientes a la ubicación de los edificios.
- Estimar la probabilidad de excedencia de los estados de daño, la matriz de probabilidad de daño y el grado de daño medio para eventos de periodos de retorno de 475 y 975 años.
- Evaluar la seguridad sísmica de los edificios considerados según los requerimientos del comité VISION 2000.
- Desarrollar índices de pérdida económica, de funcionalidad y del tiempo de recuperación considerando los resultados de las matrices de probabilidad de daño y del grado de daño medio.

1.3 Alcance

<u>Uso de los resultados</u>: los procedimientos empleados en este trabajo corresponden a evaluaciones preliminares de la seguridad y riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales. Sus resultados se consideran útiles para identificar órdenes de magnitud de las pérdidas esperadas, para orientar planes de reducción de la vulnerabilidad, así como para priorizar los edificios y/o las regiones que puedan requerir el desarrollo de estudios más detallados.

Simplificaciones en la descripción de los edificios: en este trabajo los edificios se clasifican en tipologías estructurales simplificadas. En la clasificación, además del tipo de construcción, se tiene en cuenta la edad y la altura. Al respecto, Grossi (2005) señala que el uso de información parcial sobre las características estructurales puede resultar en una estimación imprecisa del daño. Así, debe considerarse que los resultados de este tipo de análisis son útiles para dimensionar las pérdidas potenciales. A pesar de que se obtengan resultados individuales, debe considerarse que estos valores son válidos en el contexto del análisis y que por lo tanto, son útiles para realizar comparaciones dentro del conjunto de edificios analizados.

<u>Vulnerabilidad y funcionalidad</u>: la estimación de daños, pérdidas potenciales y de la funcionalidad de los edificios se asocia en la mayoría de los casos al daño físico de elementos estructurales. El desarrollo y aplicación de curvas de fragilidad /vulnerabilidad de elementos no estructurales queda fuera del alcance del estudio. Así mismo, la estimación de daños en líneas vitales y sus efectos en la funcionalidad de los edificios queda también fuera del alcance del estudio.

<u>Evaluación de daños inducidos</u>: La evaluación de pérdidas potenciales asociadas a explosiones, derrames de sustancias peligrosas, o eventos similares asociados a la falla de los edificios y sistemas esenciales queda fuera del alcance de este estudio.

2 Metodología para la evaluación de la seguridad sísmica

2.1 Introducción

El análisis de seguridad sísmica de los edificios hace referencia a la evaluación de un objetivo de comportamiento específico, o de un determinado estado límite o de daño, dada la ocurrencia de un evento sísmico de cierto periodo de retorno, o de forma equivalente, de cierta probabilidad anual de excedencia.

En el plan especial de emergencias SÍSMIcas en CATaluña (SISMICAT) (Susagna et al., 2006) se realizó una evaluación de la seguridad sísmica de algunos edificios esenciales. En dicho estudio se consideró la Intensidad Macrosísmica como medida del terremoto. En cuanto a la vulnerabilidad de los edificios, éstos se clasificaron en clases de vulnerabilidad. Para cada clase de vulnerabilidad se estimó una matriz de probabilidad de daño que relaciona, para cada intensidad macrosísmica, la probabilidad de alcanzar cada estado de daño. Así, los escenarios de daño se realizaron para un periodo de retorno de 500 años; para dicho escenario se identificaron las intensidades macrosísmicas esperadas a nivel municipal. Las intensidades fueron obtenidas incluyendo efectos de sitio, según la clasificación de suelos en el territorio catalán (Goula et al. 1998).

Paralelamente, a finales de los años 90 y a comienzos de los años 2000, se promovió el análisis de la seguridad de edificios siguiendo la filosofía de diseño basado en comportamiento. En este contexto se desarrollaron los proyectos HAZUS 99 (FEMA/NIBS 1999), HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003) y RISK-UE (Mouroux et al., 2004), cuyas metodologías incluyen, por un lado, la evaluación de la fragilidad de los edificios a partir de sus espectros de capacidad, y por el otro, la evaluación de demanda sísmica a partir de los espectros elásticos de respuesta. Su aplicación ha sido considerada para la evaluación de edificios esenciales de la ciudad de Barcelona en Irizarry (2004) y en Lantada (2007).

En este sentido, para guiar la realización de los planes municipales de emergencia en aplicación de lo indicado en el plan SISMICAT, se propone adoptar las metodologías basadas en espectros de capacidad tal como han sido propuestas en el proyecto RISK-UE para evaluar la seguridad de un conjunto de centros educativos de la provincia de Girona y de un conjunto de edificios de especial importancia de la comarca de Val d'Aran. Una vez se ha estimado la acción sísmica que pueda afectar al edificio de especial importancia se realizan las siguientes evaluaciones:

Evaluación del comportamiento sísmico de los edificios

- Inspección visual y clasificación de los edificios analizados en tipologías estructurales cuyos espectros de capacidad son conocidos.
- Evaluación del comportamiento del edificio siguiendo el método simplificado de espectros de capacidad y estimación del daño empleando curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño.

Evaluación de la seguridad: estimación de daños y de consecuencias esperadas

- Evaluación de la seguridad del edificio mediante la comparación del daño evaluado con estándares y objetivos de comportamiento
- Estimación y evaluación de las pérdidas potenciales empleando funciones de pérdida

2.2 Formulario para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica

Valcárcel (2013) elaboró un formulario para la evaluación de la vulnerabilidad de hospitales y centros educativos, cuyo uso puede extenderse para otros edificios esenciales (IGC, 2010) (Anexo A). La primera hoja del formulario, abarca datos básicos de las instalaciones, relacionados con su ubicación (calle y número, código postal, municipio) y contacto (teléfonos y persona de enlace). Respecto a la oferta de servicios, en el caso de los hospitales, se solicita información sobre el tipo de hospital (básico, de referencia o de alta tecnología), el número de camas y el porcentaje de ocupación. En el caso de los centros educativos, se solicita información sobre el nivel de enseñanza y el número de estudiantes.

La segunda hoja del formulario 2 se centra en datos de la estructura de los edificios se incluyen datos relacionados con la altura (número de plantas sobre rasante), el año o

periodo de construcción y la tipología estructural, siguiendo la matriz tipológica propuesta en el proyecto RISK-UE (Tabla 1). Para considerar otros detalles estructurales se presentan calificaciones cualitativas para la irregularidad en planta y en altura, la posibilidad de golpeteo, la existencia de columnas cortas, muros con demasiadas aberturas, daños previos y asentamientos diferenciales.

Tabla 1. Tipologías estructurales consideradas por el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004).

Tipología	Descripción
M1.1	Muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada
M1.2	Muros de carga con mampostería de piedra tallada
M1.3	Muros de carga de mampostería de sillería
M2	Muros de adobe
M3.1	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera
M3.2	Muros de carga de mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería
M3.3	Con forjados mixtos de acero y mampostería
M3.4	Con forjados de losas de hormigón armado
M4	Muros de carga de mampostería reforzada o confinada
M5	Edificio de mampostería rehabilitado
RC1	Estructuras de hormigón resistentes a momento
RC2	Muros de cortante de hormigón armado
RC3.1	Estructuras regulares con tabiquería de mampostería
RC3.2	Estructuras irregulares con tabiquería de mampostería
RC4	Sistemas duales con muros y pórticos de hormigón armado
RC5	Muros de hormigón prefabricado
RC6	Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón
S1	Estructuras metálicas arriostradas
S2	Estructuras metálicas con tabiquería de mampostería no reforzada
S3	Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados "in situ"
S4	Sistemas o estructuras mixtas de acero y hormigón armado
S5	Estructuras de madera
W	Muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada

El formulario cuenta con un documento de instrucciones en el cual se describen los datos solicitados y se dan indicaciones para rellenarlos. Así mismo, se dispone de un documento técnico en el que se presenta con mayor detalle los datos relacionados con la estructura del edificio. Ambos se pueden consultar en el Anexo A.

A partir de la inspección de los edificios, la revisión de memorias de cálculo, planos estructurales y/o arquitectónicos, fotos, etc., debe ser posible clasificar los edificios en tipologías estructurales al analizar la información recolectada en el formulario. Así, cada edificio estará caracterizado por una tipología estructural y un rango de altura para los cuales se han definido los correspondientes espectros de capacidad y, a partir de estos, las curvas de fragilidad para los estados de daño leve, moderado, extensivo y completo, de conformidad con la metodología de nivel 2 propuesta en el proyecto RISK-UE. En el Anexo B se muestran los parámetros de las curvas de capacidad, así como las dispersiones de las curvas de fragilidad para cada estado de daño recomendados por Valcárcel (2013). Las fuentes de los espectros de capacidad y las curvas de fragilidad recomendadas por las fuentes se muestran en la Tabla 2. Los rangos de altura propuestos por el proyecto RISK-UE se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Referencias recomendadas por Valcárcel (2013) para definir los parámetros de los espectros de capacidad y las curvas de fragilidad para las tipologías estructurales consideradas.

Tipología	Referencia	
M1.2	— Giovinazzi (2005)	
M3.1	— Glovinazzi (2003)	
M3.3	Bonett (2003)	
M3.4	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Università degli Studi di Genova (UNIGE); edificios sin diseño sismoresistente (pre code)	
RC2	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Aristotle University of Thessaloniki (AUTH) edificios de nivel bajo de diseño sismoresistente (Low code)	
RC3.2	Moreno (2006)	
RC3.1	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Aristotle University of Thessaloniki (AUTH) edificios de nivel bajo de diseño sismoresistente (Low code)	
S1		
S3	—	
S4	— HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003) —	
W		

2.3 Método del Espectro de Capacidad

De acuerdo con el informe ATC 40 (ATC, 1996), el comportamiento sísmico de un edificio es evaluado mediante el cruce entre su espectro de capacidad y el espectro de demanda. A través de un análisis *pushover*, la curva de capacidad de un edificio puede definirse y representa un diagrama de fuerza versus desplazamiento de la estructura. El espectro de capacidad es obtenido convirtiendo cada punto de la curva de capacidad en coordenadas espectrales del primer modo de la estructura. Por otro lado, el espectro de demanda se obtiene de manera simplificada del espectro de respuesta elástica amortiguado al 5% y reducido para tomar en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura.

Tabla 3. Rangos de altura propuestos por el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004).

Clasificación	Número de Plantas	Altura (m)
Baja (L)	1 - 2	≤ 6
Media (M)	3 – 5	6 - 15
Alta (H)	> 6	>15

La intersección entre el espectro de capacidad y el de demanda es conocida como el punto de comportamiento, ("Performance point") o punto de capacidad por demanda del edificio y representa el desplazamiento espectral máximo (sdp) de la estructura ante la acción sísmica considerada. Esta medida corresponde a la variable de decisión empleada para describir los estados de daño del edificio.

Un procedimiento simplificado, denominado "aproximación de igual desplazamiento" (ATC 40), permite la estimación de las coordenadas del punto de comportamiento. En dicho procedimiento, los edificios se caracterizan por su espectro de capacidad, expresado en forma simplificada, usando una curva bilineal definida por dos puntos característicos: (i) fluencia (Sd_y,Sa_y) y resistencia última (Sd_u,Sa_u) . Por otro lado, la acción sísmica se define a través de los espectros de respuesta elástica propios de la zona de estudio. En la Figura 1 se presentan los procedimientos para encontrar las coordenadas del punto de capacidad por demanda y del espectro de demanda sísmica.

2.4 Estimación del daño: evaluación de las curvas de fragilidad

Para cuantificar los daños esperados en el edificio ante un evento sísmico, se definen curvas de fragilidad que expresan la probabilidad de que sea excedido un determinado estado de daño, dado el desplazamiento espectral de la estructura en el punto de comportamiento. Las curvas de fragilidad se definen para los estados de daño 1-leve, 2-moderado, 3-extensivo y 4-completo. Cada estado de daño se describe en términos del desplazamiento espectral de los puntos de fluencia y de capacidad última del espectro de capacidad del edificio, representado en un formato bilineal. La Tabla 4 muestras los criterios para definir los estados de daño recomendados por el proyecto RISK-UE.

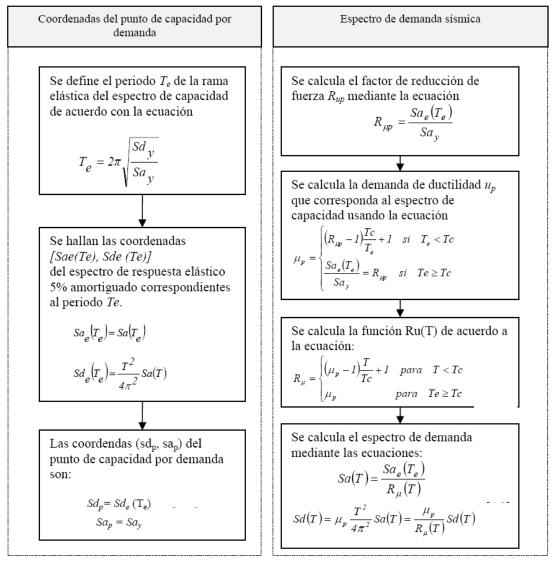


Figura 1. Cálculo del punto de capacidad por demanda y del espectro de demanda (Valcárcel, 2013).

Estado de daño (DS)	Definición $\overline{S}_{d,\mathrm{DS}}$
Leve	$Sd_1 = 0.7.Sd_y$
Moderado	$Sd_2 = Sd_y$
Extensivo	$Sd_3 = Sd_y + \frac{1}{4} \left(Sd_u - Sd_y \right)$
Completo	$Sd_4 = Sd_y$

Tabla 4. Criterios para definir los estados de daño según el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004).

En el proyecto RISK-UE, las curvas de fragilidad siguen una distribución de probabilidad lognormal (Ecuación 1) y se definen a través del valor medio $\overline{S}_{d,ds}$, (el desplazamiento espectral correspondiente a cada estado de daño ds, según los criterios establecidos en la Tabla 4–6) y su desviación estándar β_{ds} .

$$P[ds > DS_i / Sd_p] = \Omega \left[\frac{1}{\beta_{ds}} ln \left(\frac{Sd}{\overline{S}_{d,DSi}} \right) \right]$$
 (1)

en donde:

 Sd_p es el desplazamiento espectral correspondiente al punto de capacidad por demanda,

 $\overline{Sd}_{,DSi}$ es el valor medio del desplazamiento en el que el edificio alcanza un umbral del estado de daño DSi,

 β ds es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño *DSi*,

 Ω es la función de distribución (acumulativa) normal estándar.

Así, una curva de fragilidad representa la probabilidad de que un edificio iguale o exceda un estado de daño considerado y está dada por la integral entre 0 y Sd de la función de densidad de probabilidad. La Figura 2 muestran un ejemplo de las curvas de fragilidad de los estados 1-leve, 2-moderado, 3-extensivo y 4-completo (la correspondiente al grado de daño nulo es la unidad) para un edificio de hormigón armado de baja altura de tipología RC1M.

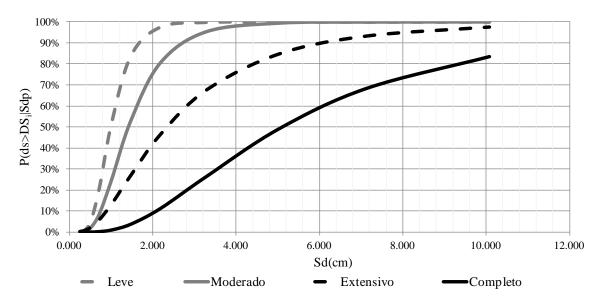


Figura 2. Curvas de fragilidad de la tipología estructural RC1M.

2.5 Estimación de las matrices de probabilidad y del grado de daño medio

Una vez definidas las curvas de fragilidad y conocido el desplazamiento espectral de la estructura en el punto de comportamiento (Sdp), es posible estimar las probabilidades de excedencia de cada estado de daño $P[ds>DS_i \mid Sdp]$. A partir de estos valores, y siguiendo la relación presentada en la Ecuación 2 es posible obtener las matrices de probabilidad de daño, las cuales expresan, para cada estado de daño y para cada escenario, la probabilidad de que el daño en la estructura sea igual a un determinado estado de daño DS_i .

$$P\left[ds = DS_i / Sd_p\right] = P\left(ds \ge DS_{i+i} / Sdp\right) - P\left(ds > DS_i / Sdp\right) \quad i=1..(N-1)$$
(2)

Similarmente, una vez conocida la matriz de probabilidad de daño, la probabilidad de que la estructura tenga un estado de daño mayor o igual a un grado de daño dado DS_i , será igual a la unidad menos la suma de las probabilidades de que se dé cualquier estado de daño inferior, tal como se presenta en la Ecuación 3.

$$P[ds > DS_i / Sd_p] = I - \sum_{j=1}^{k-1} P(DS = DS_j / Sdp)$$
(3)

Por último, el grado de daño medio puede estimarse como la suma de los estados de daño, ponderados por su correspondiente probabilidad (Barbat et al., 2008). El grado de daño medio puede normalizarse, en forma simplificada en el intervalo (0,1), dividiéndolo por el número total de estados de daño (4 en este caso). Estos resultados son útiles para evaluar la seguridad de edificios esenciales considerando los requerimientos planteados por el Comité Vision 2000 (SEAOC 1995) para diferentes periodos de retorno y niveles de comportamiento esperado.

2.6 Verificación de los niveles de comportamiento

Para verificar el comportamiento sísmico de los edificios esenciales, en este trabajo se consideran los niveles de comportamiento sugeridos en el comité Vision 2000 (Tabla 5). Así, a partir de las estimaciones de las matrices de probabilidad y del grado de daño medio, es posible revisar si la estructura cumple con dichos requisitos de seguridad.

Tabla 5. Niveles de comportamiento esperado para edificios esenciales según el comité VISION 2000.

Nivel de Comportamiento	Descripción	Estado de Daño	Periodo Retorno (años)
Totalmente operacional	Servicio continuo. <u>Sin daño</u> estructural y no estructural.	Sin Daño	72
Operacional	Daño leve. La estructura se puede ocupar seguramente. La mayoría de las funciones y operaciones se pueden retomar inmediatamente. Las operaciones esenciales se encuentran protegidas y las no esenciales pueden interrumpirse. Se deben reparar servicios no esenciales.	Reparable	475
Seguridad de la Vida	<u>Daño moderado</u> ; la estructura es estable y la seguridad de la vida está protegida. El edificio puede ser evacuado ante un futuro evento sísmico. La reparación de los daños es posible pero económicamente no es práctica.	No Reparable	970

En la Tabla 6 se presentan las interpretaciones de los autores de las diferentes escalas de daño para estructuras de hormigón armado. Estos valores son útiles para identificar los rangos del índice de daño correspondientes al comportamiento operacional y de seguridad de la vida propuestos por el comité VISION 2000. Para el

nivel de comportamiento operacional, el índice de daño varia entre 20 y 50, mientras que para el nivel de comportamiento de seguridad de la vida el mismo varia entre 50 y 70.

Escala homogénea del Indice de Daño		HAZUS (1999)	VISION 2000 (SEAOC 1995)	FEMA 273 (1997)	EMS98- MSK	AIJ	ATC-13 (1985)	ATC-21 (1988)
0	Ninguno	Sin daño						
10	Ligero		Completamente	Ocupación inmediata	Grado 1 - D1	Leve	Ligero	Marca verde
20	Leve	7:	operacional				Leve	
30		Ligero	Operacional		Grado 2 - D2	Menor		
40				Control de daños				
50	Moderado		-		Grado 3- D3			Marca amarilla
60		Moderado	Conveided de le viide	da Seguridad de la vida		Moderado		
70			Seguridad de la vida				Fuerte	
80	Extensivo	Extensivo	Cerca al colapso	Seguridad limitada		Mayor	ruerte	Marca roja
90				Prevención de	Grado 4- D4		Mayor	
100	Colapso parcial			colapso		Colapso parcial		
	Limite del estado de colapso							

Tabla 6. Índices de daño según diferentes escalas (Rossetto y Elnashai, 2003).

Al expresar estos rangos en función del grado de daño, podemos observar que un grado de daño superior al 2.0 implica haber sobrepasado el 50% del índice de daño por lo que es el límite superior para cumplir con el nivel de comportamiento operacional. De igual manera el límite superior para cumplir con el nivel de comportamiento de seguridad de la vida sería un grado de daño de 2.8 que correspondería a superar el 70% del índice de daño.

2.7 Estimación del índice de pérdida económica

Tomando como referencia las metodologías más recientes para la estimación de índices de daño y de las pérdidas económicas correspondientes, Valcárcel (2013) propuso la evaluación de un índice de pérdida considerando un rango de valores posibles para cada estado de daño. Para cada estado de daño, los valores posibles del costo de de pérdida están definidos por funciones de pertenencia tal como se presenta en la Figura 3.

En estas funciones de pertenencia las abscisas corresponden a un determinado porcentaje de pérdida respecto al valor de reposición del edificio (x) y las ordenadas a la pertenencia $\chi_{DS}(x)$ o a la posibilidad de encontrar dicho porcentaje de pérdida en el estado de daño DS.

Las ordenadas de las funciones de pertenencia $\chi_{DS}(x)$ se calcularon como sigue:

$$\chi_{DS}(x) = \begin{cases} 0 & si \ x \le l \ inf_{DS} \\ 1 - \left(\frac{V max_{DS} - x}{V max_{DS} - l \ inf_{DS}}\right)^2 & si \ l \ inf_{DS} < x \le V max_{DS} \\ 1 - \left(\frac{x - V max_{DS}}{l \ sup_{DS} - V max_{DS}}\right)^2 & si \ V max_{DS} < x \le l \ sup_{DS} \end{cases}$$

$$(4)$$



Figura 3. Funciones de pertenencia adoptadas por Valcárcel (2013) para la evaluación del índice de pérdida económica.

En la Ecuación 4 $linf_{DS}$ corresponde al límite inferior de la función de pertenencia del estado de daño DS. $Vmax_{DS}$ corresponde al valor de máxima pertenencia y $lsup_{DS}$ corresponde al límite superior de la función de pertenencia. En la Tabla 7 se presentan los rangos del índice de pérdida considerados por Valcárcel (2013) para cada estado de daño.

Para estimar el índice de pérdida económica, Valcárcel (2013) propone el siguiente procedimiento:

- Para cada estado de daño, multiplicar (normalizar) las ordenadas de las funciones de pertenencia por la probabilidad de daño correspondiente, de acuerdo a los resultados de la matriz de probabilidad de daño.
- Calcular la envolvente de las funciones de pertenencia normalizadas.
- Calcular el centroide de la envolvente de las funciones de pertenencia normalizadas.
- Si en la matriz de probabilidad de daño, la probabilidad del estado de daño completo es menor que 0.1%, entonces el centroide corresponde al índice de pérdida. De lo contrario, si la probabilidad del estado de daño completo es mayor que 0.1% dividir el centroide por 0.7972. Dicho valor corresponde al índice de pérdida.

Tabla 7. Definición del índice de pérdida tomando un conjunto de valores aceptables según estado de daño (estructural).

Orada da	Índice de Pérdida Económica					
Grado de Daño	Límite Inferior (<i>linf_{DS}</i>)	Valor Máximo (<i>Vmax_{DS}</i>)	Límite Superior (Isup _{DS})			
Nulo	0	0.025	0.05			
Leve	0	0.1	0.2			
Moderado	0.05	0.25	0.4			
Extensivo	0.3	0.35	0.7			
Completo	0.5	0.9	1			

Valcárcel (2013) aplicó este procedimiento para obtener curvas que relaciona el desplazamiento espectral en el punto de comportamiento y el índice de pérdida que son específicas de cada tipología estructural. Como ejemplo, se presenta el caso de un edificio de pilares y forjados de hormigón armado con muros de relleno de mampostería irregulares, de baja altura (RC3.2L), ubicado en roca firme. Para estimar la acción sísmica se utilizaron los espectros del Eurocódigo 8 Tipo II y se normalizaron por un conjunto arbitrario de valores de PGA's que varía entre 0.01 g y 0.7 g.

En la Figura 4 se presentan los resultados del índice de pérdida económica y el grado de daño medio estimados tales escenarios. Se observa que para los estados de daño leve y moderado, las pérdidas son respectivamente del orden del 20% y 30% del costo de reposición del edificio. Por otro lado, para desplazamientos espectrales cercanos al umbral del estado de daño completo, el índice de pérdida se aproxima a 100% del costo de reposición del edificio.

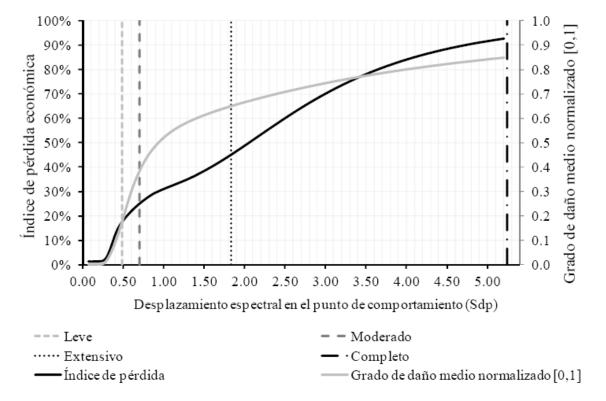


Figura 4. Índices de pérdida económica y grado de daño medio (normalizado [0,1]) obtenidos por Valcárcel (2013) para un edificio de la tipología RC3.2L. Uso de espectros del EC8 tipo II en roca firme.

De esta misma manera Valcárcel (2013) desarrolló una curva que muestra la relación directa entre el grado de daño medio normalizado y el índice de pérdida propuesto que también es específica para cada tipología estructural. En la Figura 5 se muestra esta curva para el ejemplo de la tipología RC3.2L ubicada en roca firme. Así, es posible expresar los resultados del análisis de vulnerabilidad estructural a través del índice de pérdida económica y del grado de daño medio. Dado que esta metodología está enfocada hacia la evaluación de la seguridad de un conjunto de edificios esenciales a nivel regional, no se ha considerado evaluar la vulnerabilidad no estructural dado el detalle de la información necesaria para este cálculo.

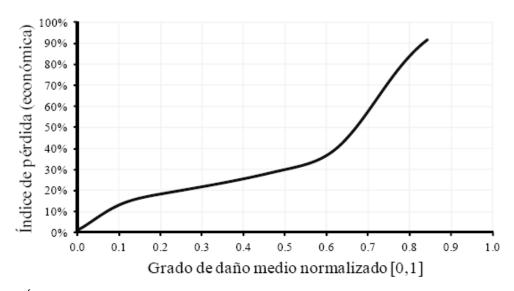


Figura 5. Índice de pérdida y grado de daño medio normalizado [0,1]. Edificio de la tipología RC3.2L. Uso de espectros del EC8 tipo II en roca firme.

2.8 Estimación del índice de funcionalidad y del tiempo de recuperación

En cuanto a la evaluación de la funcionalidad de la instalación ante un determinado nivel de daño, Valcárcel (2013) propone un índice de funcionalidad a partir de de los valores del índice de daño presentados en la Tabla 6 para el caso de la metodología de FEMA 273 y del comité Vision 2000, así como los niveles de comportamiento propuestos en los documentos FEMA 273 y FEMA 356 (Tabla 8), los cuales son adoptados para los centros educativos y hospitales en los documentos FEMA 395 y FEMA 396 respectivamente.

Tabla 8. Niveles de comportamiento para hospitales.

		Niveles de C	Comportamiento	
Tipo de Daño	Prevención de Colapso (5-E)	Seguridad de la Vida (3-C)	Ocupación Inmediata (1-B)	Operacional (1-A)
Daño General	Severo	Moderado	Leve	Muy Leve
No Estructural	Daño Extensivo	Muchos elementos arquitectónicos, mecánicos y eléctricos están dañados	Los equipos y contenidos están seguros. Pueden existir fallas en líneas vitales y elementos mecánicos	Sin daño. Las líneas vitales se encuentran en funcionamiento o existen sistemas redundantes

Así, el índice de funcionalidad se define según intervalos de acuerdo al valor esperado del daño, tal como se presenta en la Figura 6 y en la Ecuación 5 donde $L_f(ED)$, es el índice de funcionalidad, ED corresponde al valor esperado del daño, y C1 y C2 a constantes definidas en 0.3 y 3 respectivamente.

$$L_{f}(ED) = \begin{cases} 1 - 0.5ED & \text{si } ED \leq 0.2 \\ exp(LOG(0.5). \left(\frac{ED}{CI}\right)^{C2} & \text{Si } ED \leq 0.7 \\ 0 & \text{si } ED > 0.7 \end{cases}$$
 (5)

La Figura 6 también muestra una estimación del tiempo de recuperación asociado al daño esperado en la instalación recomendado por Valcárcel (2013) y propuestos en el documento FEMA 227 (FEMA 1992) como valores típicos de recuperación para edificios de oficinas y edificios para servicios profesionales, técnicos y de negocios. En la Figura 6 se muestra la curva que relaciona el tiempo de recuperación con el grado de daño medio normalizado.

Tabla 9. Tiempos de recuperación propuestos en el FEMA 227.

Estado de daño	Tiempo (días)
Ninguno	0
Ligero	3.4
Leve	12.1
Moderado	44.7
Extensivo	125.7
Colapso Parcial	235.8
Colapso	346.9

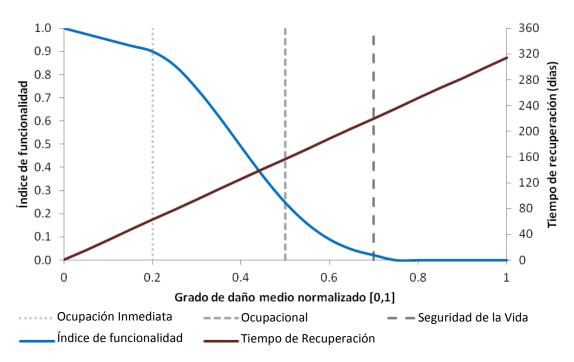


Figura 6. Índice de funcionalidad y tiempo de recuperación según el grado de daño medio normalizado.

3 Evaluación de la demanda sísmica en Cataluña

3.1 Introducción

Para poder implementar el procedimiento propuesto por Valcárcel (2013) para la evaluación de la seguridad de los edificios de especial importancia es necesario definir la demanda sísmica a la cual se podría enfrentar el edificio durante su vida útil. Como se ha comentado en el capitulo anterior es necesario que esta demanda física se defina en términos de valores espectrales para evaluar el punto de comportamiento mediante el método del espectro de capacidad.

Para conseguir este objetivo se requiere calcular espectros de aceleración de probabilidad uniforme para los periodos de retorno de interés. Estos espectros de aceleración de probabilidad uniforme se tienen que adaptar a las formas espectrales sugeridas en códigos sismorresistentes como el EC8. Además este espectro de aceleración de probabilidad uniforme debe adaptarse a la caracterización del suelo del emplazamiento del edificio a evaluar.

En el caso de Cataluña los espectros de aceleración de probabilidad uniforme se pueden obtener de la evaluación probabilista de la peligrosidad en términos de aceleración espectral de GEOTER (2008). La caracterización del tipo de suelo y de su influencia en la peligrosidad del emplazamiento se obtiene del mapa de la Mesozonación Sísmica de Cataluña desarrollado por el IGC (2011). De esta manera para casa edificio de importancia especial que se quiera analizar en Cataluña de puede obtener un espectro de probabilidad uniforme considerando los efectos de suelos debido a su emplazamiento.

3.2 Espectros de probabilidad uniforme

El trabajo realizado por GEOTER (2008) desarrolló mapas de peligrosidad sísmica en términos de aceleración espectral para periodos de retorno de 475, 975 1975 años y 10 periodos estructurales entre 0.0 y 2.0 segundos seleccionados de tal manera para

poder obtener espectros de respuesta de aceleración de probabilidad uniforme para cualquier emplazamiento en Cataluña.

Este trabajo se basó en el catálogo sísmico desarrollado en Secanell et al. (2008). Es un catálogo unificado a partir de los datos existentes en cuatro catálogos macrosísmicos y en cinco catálogos instrumentales provenientes de Cataluña, España y Francia. Para este catalogo, Secanell et al. (2008) adaptó la magnitud local, ML como la magnitud homogénea, realizó un proceso de limpiado de réplicas y precursores, y estudió los periodos de completitud.

En este análisis se consideraron dos zonaciones sismotectónicas para tener en cuenta las incertidumbres existentes relativas a la zonación sísmica y un modelo de suavizado (Woo, 1996) que representa un modelo alternativo al modelo clásico de zonación ya que, de hecho, representa la ausencia total de zonación sismotectónica (Secanell et al., 2008). Se adoptó un modelo doblemente truncado de Gutenberg-Richter y se utilizó una ley de atenuación regional basada en datos locales (Tapia, 2006) para 6 periodos espectrales, la relación de Ambraseys (1995) para PGA y la relación de Ambraseys et al., (1996) para valores de periodos espectrales diferentes al PGA.

Para la evaluación de la peligrosidad se han utilizado dos modelos conceptuales diferentes: uno zonificado (Cornell, 1968 y McGuire, 1976) y otro no zonificado (Woo, 1996). El software CRISIS99 (Ordaz et al., 1999) se utilizó para implementar el modelo zonificado dado que permite el cálculo de espectros de respuesta uniforme y de curvas de peligrosidad sísmica. Para el modelo no zonificado se utilizó el software desarrollado por Woo (1996). Para considerar la dispersión de los resultados, en ambos casos, se aplica una metodología de propagación de las incertidumbres utilizando árboles lógicos y procesos de Montecarlo a través del software GEOSIS (Martin et al., 2002).

Para cada rama secundaria y para cada punto de la malla del análisis se obtiene la tasa de excedencia de un cierto nivel de aceleración. Una vez definidos los pesos estadísticos de cada rama principal del árbol lógico, se obtienen las distribuciones de aceleración para cada punto de la malla. Los resultados finales se presentan en términos de los valores de aceleración mediana y percentiles 15% y 85%. Los cálculos se han realizado para tres periodos de retorno: 475, 975 y 1975 años, y para diez periodos estructurales: 0.0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5 y 2 segundos.

La Figura 7 muestra los valores medios de la aceleración pico del terreno (PGA) correspondientes a un periodo de retorno (Tr) de 475 años. Todos los cálculos se han realizado asumiendo un tipo de terreno equivalente a roca firme.

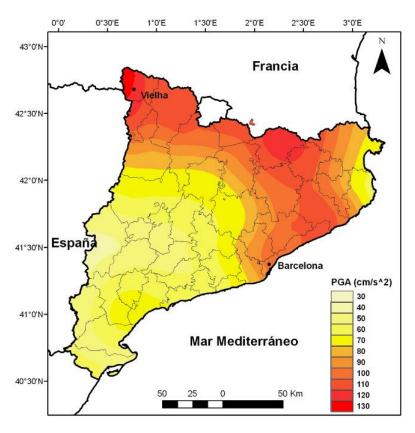


Figura 7. Valores medios de la aceleración pico del terreno (PGA) para un periodo de retorno (Tr) de 475 años (GEOTER, 2008).

3.3 Caracterización del efecto del suelo

Para evaluar la seguridad sísmica de los edificios de especial importancia es necesario conocer el tipo de suelo donde está emplazado el edificio y estimar la influencia que este suelo tiene en la demanda sísmica que actuará sobre el mismo. La estimación de la acción sísmica en la superficie, a escala regional, implica definir los tipos de suelo que se van a considerar, las metodologías para identificar los tipos de suelo y finalmente, cuáles son los factores de amplificación que deben asignarse a cada tipo de suelo. Al respecto, la velocidad de las ondas de corte Vs30, es un criterio empleado para clasificar los suelos y así determinar los efectos de sitio.

Dentro del marco del proyecto SISPYR, el Instituto Geológico de Cataluña ha desarrollo un mapa de mesozonación sísmica a escala 1:100,000 (IGC, 2011) en el cual los suelos de toda Cataluña se han clasificado en 6 tipos de suelos basadas en las categorías del EC8 e incorporando nuevas clases para considerar efectos de la geología profunda. El mapa de la mesozonación sísmica se muestra en la Figura 8 y las columnas representativas de cada tipo de suelo se muestran en la Figura 9.

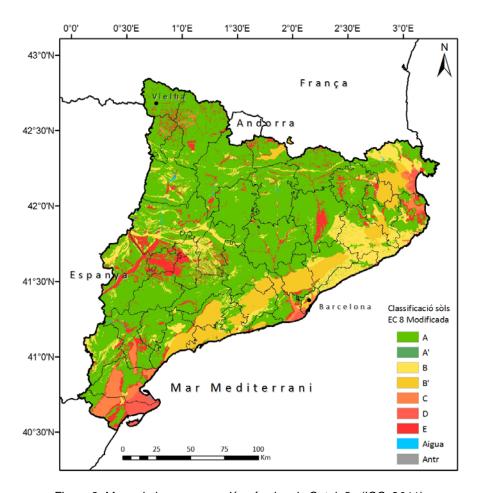


Figura 8. Mapa de la mesozonación sísmica de Cataluña (IGC, 2011).

La Tabla 10 presenta la descripción de los tipos de suelos considerados en la mesozonación incluyendo la velocidad de las ondas de cortante, Vs₃₀, y el espesor característico. Para cada tipo de suelo, en el marco del proyecto SISPYR se desarrollaron espectros de respuesta característicos combinando los resultados de medidas en campo con los parámetros de las formas espectrales de los códigos de construcción sismo resistente español, francés y del EC8 para los espectros tipo II. De esta manera, los espectros resultantes pueden considerarse como una adaptación de los espectros del EC8 para las condiciones de la región del Pirineo.

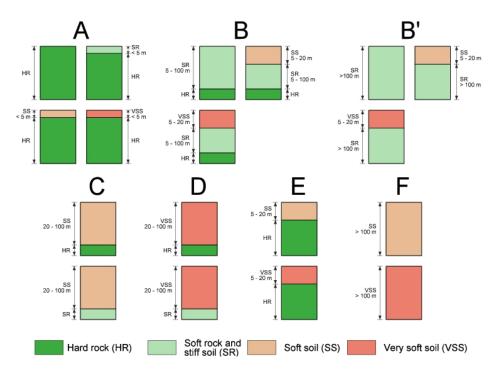


Figura 9. Tipos de suelos considerados en la mesozonación sísmica de Cataluña (IGC, 2011).

Tabla 10. Descripción de los tipos de suelos considerados en la mesozonación de Cataluña (IGC, 2011).

Tipo de	Descripción		Espesor
suelo			(m)
Α	El mismo suelo A del EC8 tipo II; la misma definición para suelo tipo roca.	>800	<5
В	El mismo suelo B del EC8 tipo II de bajo a medio espesor	360-800	5-100
	Similar al suelo B del EC8, con un espesor muy grande. Esta clase		
B'	presenta menos amplificación a periodos menores y más amplificación en	360-800	>100
	periodos medios.		
	Similar al suelo C del EC8, con espesor medio o bajo. El valor de Tc se fija	180-360	20-100
С	alrededor de 0.3 s para representar amplificaciones en periodos medianos	100-300	20 100
	Similar al tipo D del EC8, con espesor medio o bajo. Se esperan menores	<180	20-100
D	amplificaciones que en el tipo E para periodos bajos	<100	
E	Similar al tipo E del EC8.		5-20
F	Esta nueva categoría tiene en cuenta suelos tipo C y D con espesores		
	mayores que 100 m. Para esta razón, los valores de Tc se definen mayores	<360	>100
	que los demás (para amplificar los periodos más largos)		

Los espectros de respuesta correspondientes a cada tipo de suelo se definen siguiendo las formas espectrales del EC8 Tipo II y considerando los parámetros presentados en la Tabla 11, de acuerdo a la Ecuación 6.

$$a(T) = \begin{cases} a_g \cdot S_{TS} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (2.5 \cdot \eta - 1) \right] & Si \ 0 \le T \le T_B \\ 2.5 \cdot a_g \cdot S_{TS} \cdot \eta & Si \ T_B \le T \le T_C \\ 2.5 \cdot a_g \cdot S_{TS} \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) & Si \ T_C \le T \le T_D \\ 2.5 \cdot a_g \cdot S_{TS} \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right) & Si \ T_D \le T \le 4s \end{cases}$$

$$(6)$$

donde a_g es a la aceleración pico del terreno en roca para el periodo de retorno considerado, S_{TS} es el factor de amplificación correspondiente a cada tipo de suelo y η corresponde al factor de corrección por amortiguamiento. Este factor de corrección por amortiguamiento se considera igual a la unidad ya que se considera un amortiguamiento del 5%. En la Figura 10 se presentan los espectros de respuesta elástica correspondientes para cada tipo de suelo y normalizados (a_g =1) (Colas et al., 2013).

Tabla 11. Parámetros de los espectros de respuesta de aceleración propuestos por el proyecto SISPYR para cada tipo de suelo en la mesozonación de Cataluña (Colas et al., 2013).

Tipo de suelo	Tipo de espectro	S	Tb(S)	Tc(s)	Td(s)
А	A-EC8 tipo 2	1.00	0.05	0.25	1.20
В	B-EC8 tipo 2	1.35	0.05	0.25	1.20
B'	Nuevo	1.20	0.05	0.35	1.20
С	C-EC8 tipo 2	1.50	0.10	0.3	1.20
D	D EC8 tipo 2 con S del tipo E	1.60	0.10	0.30	1.20
E	E EC8 tipo 2 con S del tipo D	1.80	0.05	0.20	1.20
F	Nuevo	1.50	0.10	0.40	1.20

3.4 Adaptación de los espectros probabilistas a espectros normativos

Los espectros de aceleración obtenidos a través del análisis probabilista de la peligrosidad sísmica corresponden a valores en roca firme, por lo tanto, para conocer las acciones sísmicas en la superficie de suelos no rocosos, hace falta introducir los efectos del tipo de suelo. Valcárcel (2013) demostró que los espectros Tipo II del EC8 se asemejan más a los obtenidos en el PSHA, siendo consistentes con su uso para zonas de sismicidad moderada, y por eso propone adaptar los espectros de

aceleración obtenidos en el estudio de peligrosidad a los formatos propuestos en el Eurocódigo 8 (Figura 11). De esta manera, la estimación de la demanda sísmica en el emplazamiento de estudio se podrá realizar aplicando los parámetros propuestos en la Tabla 11 para los diversos tipos de suelo identificados en Cataluña.

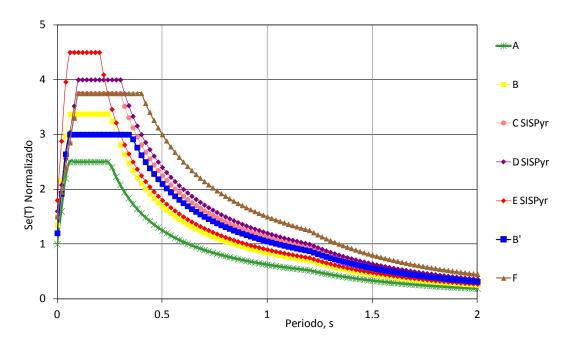


Figura 10. Espectros de respuesta de aceleración (normalizados) propuestos para cada tipo de suelo (Colas et al., 2013).

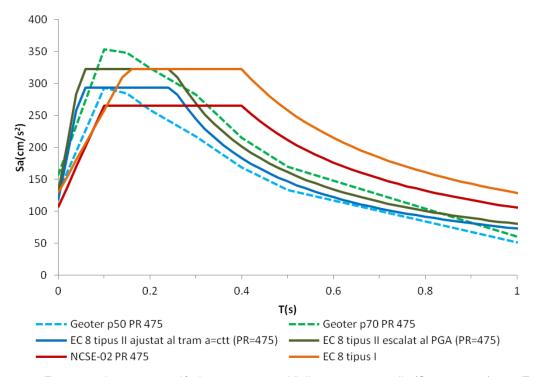


Figura 11. Espectros de respuesta elástica en roca para Vielha: espectro medio (Geoter, 2008) para Tr475 y percentiles 50 y 70 junto a varios espectros normativos con distintos escalados.

Para el ajuste de los espectros, Valcárcel consideró dos alternativas. En la primera se realizan ajustes a espectros del EC8 Tipo II para que la meseta de aceleración constante sea igual al valor máximo de los espectros obtenidos en el PSHA. La segunda consiste en normalizar los espectros del EC8 Tipo II según el PGA del estudio. Para evaluar la similitud entre los espectros se ha estimado el Error Absoluto Medio (MAE). Estas comparaciones se realizan en todos los puntos de la región de Cataluña por lo que se generan mapas con el MAE obtenido para cada alternativa.

3.4.1 Ajuste de la meseta de aceleración constante

La Figura 12 presenta el MAE como medida de ajuste de los espectros del EC8 Tipo II ajustados a la meseta de aceleración constante. Los valores del MAE muestran que, en cada periodo de los espectros, las diferencias pueden ser en promedio entre 2 y 20 cm/s2 según su localización. Al comparar esta figura con el PGA medio estimado para un periodo de retorno de 475 años (Figura 7) se observa que, en las zonas de menor PGA, los espectros normativos son más similares a los obtenidos en el PSHA.

En este ajuste es de interés revisar la razón entre la meseta de aceleración constante y el PGA, así como su correspondencia con el valor 2.5 propuesto en los espectros del EC8. En la Figura 13 se presenta dicha razón normalizada por 2.5. Al respecto, se señala que los espectros del EC8 Tipo II, escalados por el PGA son mayores que los valores medios estimados en el PSHA. Así, al reducirlos por el factor presentado en la Figura 13, se observa que cuanto menor sea este factor, los espectros se ajustan mejor (el MAE es menor) a los obtenidos en el PSHA (ver Figura 12).

En esta alternativa de ajuste, el PGA estimado en el PSHA se reduce en todos los casos por el factor presentado en la Figura 13, el cual varía entre 0.7 y 0.92 en la zona de análisis. Para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales, este tipo de espectros pueden ser útiles para representar la demanda sísmica correspondiente a los valores medios de eventos de periodo de retorno de 475 años. Se señala que para estos eventos, se requiere que estas instalaciones presenten daños leves y permanezcan operacionales, de acuerdo a las consideraciones del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995). Así, estos escenarios son de interés para los encargados de la protección civil (así como de los sectores de educación y salud) para evaluar el comportamiento de estas instalaciones.

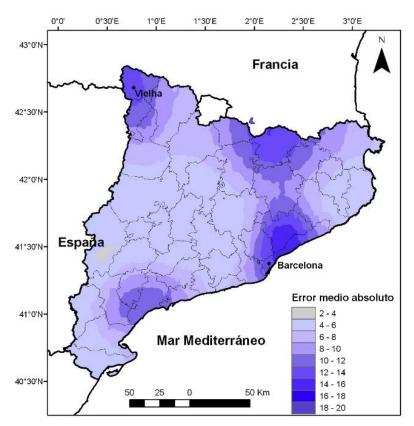


Figura 12. Error medio absoluto. Comparación con espectros EC 8 Tipo II escalados al PGA y ajustados en la meseta de aceleración constante (Tr 475 años, valores medios).

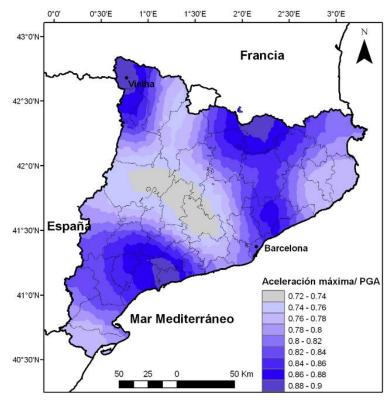


Figura 13. Razón entre la aceleración máxima y el PGA, normalizada al valor 2.5 (Tr 475 años, valores medios)

3.4.2 Normalización a la aceleración pico del terreno del PSHA

La otra alternativa de ajuste tiene como objetivo conservar el valor del PGA obtenido en el PSHA. En la Figura 11 se observa que los espectros Tipo II del EC-8, escalados al PGA del estudio, se acercan a percentiles superiores al 50% para un periodo de retorno de 475 años. Ya que se conocían los valores medios y las desviaciones estándar para cada uno de los puntos de los espectros, Valcárcel (2013) calculó los percentiles 60, 65, 70, 75 y 80 suponiendo una distribución normal.

De esta manera, Valcárcel (2013) identificó que los espectros escalados del EC 8 Tipo II se asemejan a aquellos estimados para un percentil 70 (los valores del MAE oscilan entre 3.6 y 18 cm/s2). Así, para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales, el uso de estos espectros implica un mayor nivel de seguridad, lo cual corresponde a la filosofía de diseño y comportamiento deseado de estos edificios.

Para tener una idea de cuál sería la seguridad asociada al uso de estos espectros, se realizó una comparación con los valores medios para un periodo de retorno de 975 años. Para su evaluación se calculó el MAE para todos los puntos considerados en el estudio (Figura 14). Estos valores muestran que, en cada periodo de los espectros, las diferencias pueden ser en promedio entre 5 y 29 cm/s2 según su localización, de tal forma que en las zonas de mayor PGA se encuentran mayores valores del MAE. Aunque en algunos puntos las diferencias son apreciables, se observa que los espectros del EC 8 tipo II, escalados al PGA del estudio, son comparables a los obtenidos en el PSHA para un periodo de retorno de 975 años.

Para eventos de período de retorno de 975 años, (poco probables), el comportamiento deseado de los edificios esenciales debe ser tal que, aunque se presenten daños moderados en la estructura, se garantice la seguridad de los ocupantes (SEAOC 1995). Para aumentar la confiabilidad de estos edificios se usan coeficientes de importancia que incrementan los espectros normativos. Como alternativa para revisar los valores de estos coeficientes, en la Figura 15 se presenta la razón entre el valor medio del PGA estimado para periodos de retorno de 975 y 475 años. Se observa que ésta razón varía entre 1.21 y 1.45 en el área del análisis, encontrándose los valores más altos en los lugares en los cuales se espera menor PGA.

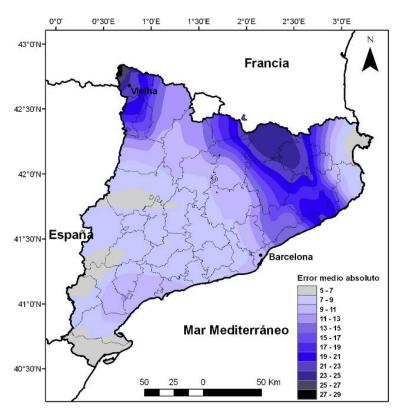


Figura 14. Error medio absoluto. Comparación entre espectros del EC 8 Tipo II y los espectros del PSHA para periodos de retorno de 975 años (valores medios).

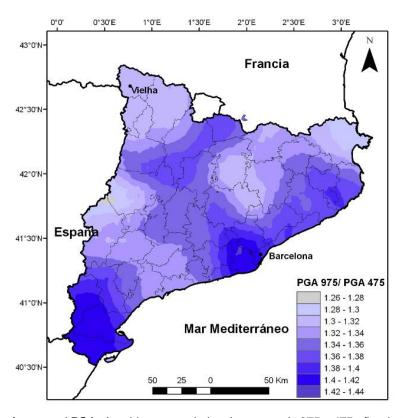


Figura 15. Razón entre el PGA obtenido para periodos de retorno de 975 y 475 años (valores medios).

Valcárcel (2013) confirma que estos valores de la razón entre el valor medio del PGA estimado para periodos de retorno de 975 y 475 años son cercanos a los coeficientes de importancia de los edificios esenciales considerados en el EC8 y en la NCSE-02. Al ser una simplificación para aumentar la confiabilidad de estas instalaciones suponiendo una mayor demanda sísmica, contribuyen a realizar el análisis del comportamiento de estas instalaciones cuando no se cuenta con información para diferentes periodos de retorno.

De esta manera conociendo los valores de PGA para un periodo de retorno de 475 años (Figura 7) se pueden estimar los espectros de aceleración en roca con la forma espectral del EC8 para los periodos de retorno de 475 y 975 años. Para obtener el espectro de aceleración para un periodo de 475 años compatible con la forma del espectro EC8 tipo II, el PGA a usarse corresponde al PGA obtenido mediante el análisis probabilístico de la peligrosidad sísmica llevado a cabo por Geoter (2008) partido por el coeficiente de ajuste a la meseta de aceleración constante del espectro del EC8 (Figura 13). Si se requiere el espectro de espectro de aceleración para un periodo de 975 años compatible con la forma del espectro EC8 tipo II se utiliza directamente el PGA para un periodo de 475 años obtenido mediante el análisis probabilístico de la peligrosidad sísmica llevado a cabo por Geoter (2008).

4 Ejemplo de la evaluación de la seguridad sísmica

4.1 Introducción

A continuación se presenta la aplicación del método simplificado de evaluación de la seguridad a un edificio del hospital (Espitau) de Val d'Aran ubicado en el municipio de Vielha e Mijaran (Figura 16). Valcárcel (2013) y Rodríguez (2010) realizaron la inspección visual necesaria para rellenar el formulario de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios de especial importancia que se muestra en el Anexo A. De esta manera se adquirieron datos básicos de la instalación, así como las propiedades estructurales de los edificios que la componen. En la visita también se calificaron la regularidad en planta y en altura, la existencia de daños previos y la posibilidad de golpeteo. Como complemento, se realizaron consultas en planos, memorias de obra, entre otros documentos gráficos que facilitaron la clasificación de su tipo constructivo.



Figura 16. Ubicación del Espitau de Val d'Aran.

4.2 Peligrosidad sísmica que afecta al Espitau de Val d'Aran

En este ejemplo, el análisis de seguridad se realiza para un escenario de periodo de retorno de 475 años. El PGA del Espitau de Val d'Aran es de 0.108g para un periodo de retorno de 475 años. La Figura 17 muestra los espectros de respuesta de aceleración obtenidos por GEOTER (2008). Estos espectros se adaptaron a las formas espectrales normativas del EC8 Tipo II tal y como se explica en el Capítulo 3. La Figura 18 muestra los espectros de demanda obtenidos para los periodos de retorno de 4775 y 975 años.

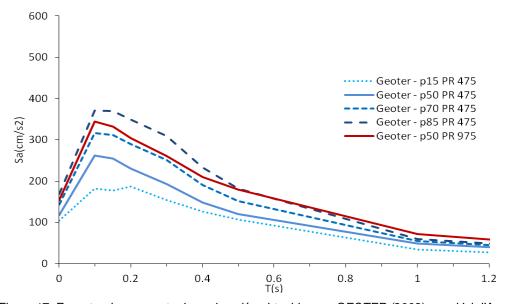


Figura 17. Espectro de respuesta de aceleración obtenidos por GEOTER (2008) para Val d'Aran.

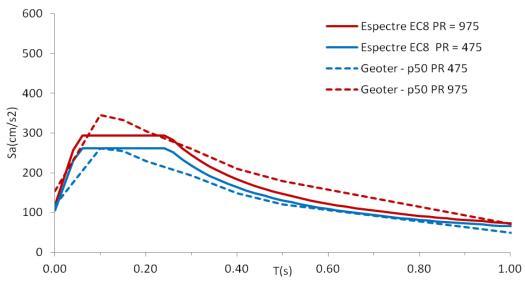


Figura 18. Espectro de demanda ajustado para el Hospital de Val d'Aran.

4.3 Caracterización de los suelos y peligrosidad local

Mediante la localización del Espitau de Val d'Aran en el mapa de la mesozonació sísmica de Cataluña (Figura 8) se pudo identificar que los suelos donde se ubica corresponden a un suelo tipo E como se muestra en la Figura 19. El tipo de suelo E está caracterizado como un suelo blanco o muy blando de espesor delgado (entre 5 y 20 m) y en contacto con roca dura.

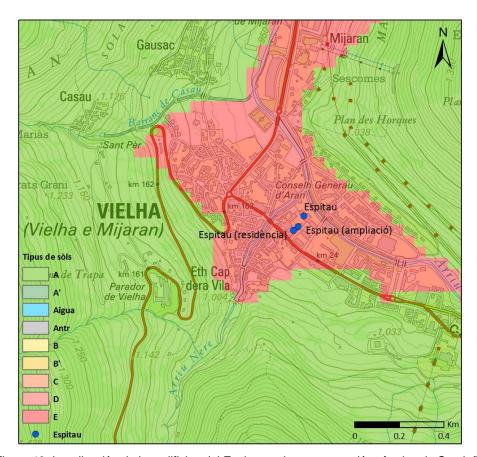


Figura 19. Localización de los edificios del Espitau en la mesozonación sísmica de Cataluña.

La Figura 20 muestra el espectro de demanda ajustado para el Espitau de Val d'Aran incluyendo los efectos de suelos del tipo E según se explicó en la sección 3.3 del Capitulo 3. El PGA del espectro de demanda para un suelo medio con un valor de 0.11g pasó a ser de 0.19g al incluir los efectos del suelo tipo E para un periodo de retorno de 475 años y de 0.22g para un periodo de retorno de 975 años. El valor espectral de la meseta del espectro de demanda también aumentó llegando a un valor de 0.53g.

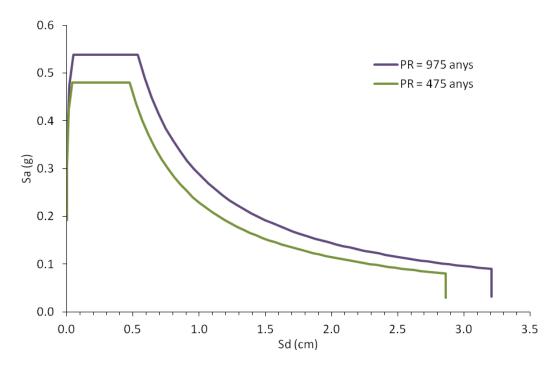


Figura 20. Espectro de demanda ajustado para el Hospital de Val d'Aran con efectos de suelo.

4.4 Espitau de Val d'Aran

El complejo del hospital de Val d'Aran consta de 3 edificios: el hospital original, la residencia y otro que conforma una reciente ampliación del hospital. En la Figura 21 se presentan fotos de la fachada, distribución de pilares y forjado del edificio original. El hospital original es una estructura de pilares de hormigón armado con forjados reticulares y muros de relleno de mampostería no reforzada. La planta de este edificio es rectangular, alargada y tiene tres niveles sobre rasante. Existe un espacio abierto entre la planta baja y la primera planta por lo que se considera que existe alta irregularidad en altura.

De acuerdo a estos datos, el edificio se clasifica como de tipología RC3.2. De esta misma manera Valcárcel (2013) evaluó la tipología de los otros dos edificios del Espitau determinando que la ampliación también tiene una tipología RC3.2 mientras que la residencia tiene una estructura del tipo M3.4. En la Tabla 12 se presentan los parámetros del espectro de capacidad de cada tipología, mientras que en la Figura 22 muestra las curvas de capacidad de los 3 edificios que forman el Espitau de la Val d'Aran.

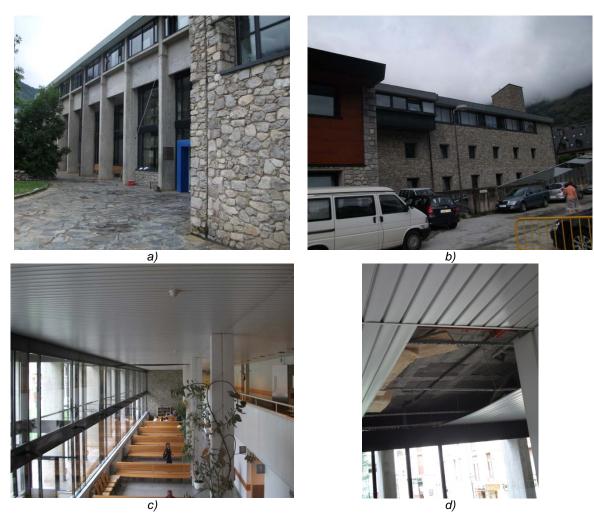


Figura 21. Fachadas del Espitau (a y b); Pilares (c) y forjado (d) de la estructura (Valcárcel, 2013).

Tabla 12. Parámetros del espectro de capacidad de la tipología (Valcárcel, 2013).

		Flue	ncia	Capacidad ultima	
Edificio	Tipología	Sd _y (cm)	Sa _y (g)	Sd _u (cm)	Sa _u (g)
Espitau	RC3.2L	0.70	0.13	5.24	0.14
Ampliación Espitau	RC3.2M	1.42	0.08	5.11	0.12
Residencia Espitau	M3.4M	0.75	0.15	3.47	0.15

4.5 Determinación del punto de capacidad por demanda

Para determinar el punto de capacidad por demanda mediante el método del espectro de capacidad se cruzan gráficamente el espectro de demanda que representa al escenario sísmico considerado y el espectro de capacidad de la estructura a ser analizada siguiendo la aproximación de igual desplazamiento.

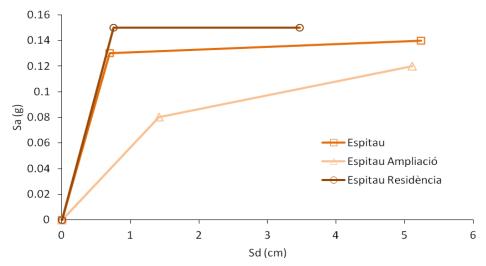


Figura 22. Curvas de capacidad de los edificios que forman el Espitau de Val d'Aran.

La Figura 23 presenta el procedimiento por el cual se ha determinado el punto de comportamiento para el edificio principal del Espitau. Como se puede observar se ha extendido el tramo elástico del espectro de capacidad hasta cruzar el espectro de demanda y en ese punto se baja hasta volver a encontrar el espectro de capacidad. Este punto es entonces el punto de capacidad por demanda que en la figura se marca con un punto negro. La Tabla 13 muestra las coordenadas del punto de desempeño de cada uno de los edificios para un periodo de retorno de 475 años.

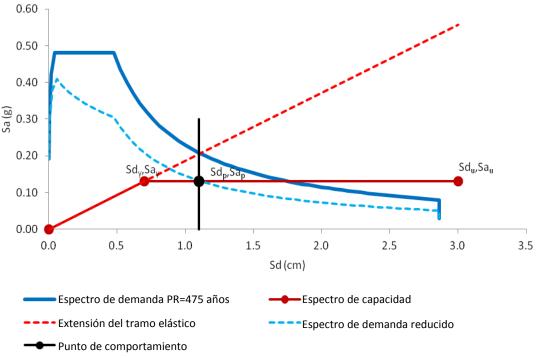


Figura 23. Determinación del punto de capacidad por demanda: Espitau.

Edificio	Sd _p (cm)	Sa _p (g)
Espitau	1.10	0.13
Ampliación Espitau	2.01	0.08

1.07

0.15

Tabla 13. Coordenadas del punto de comportamiento por demanda para cada edificio del Espitau.

4.6 Determinación de la matriz de probabilidad de daño

Residencia Espitau

Las curvas de fragilidad de cada tipología estructural se usan junto al punto de comportamiento por demanda para determinar la matriz de probabilidad de daño como se puede observar en la Figura 24 para el caso del edificio principal del Espitau de Val d'Aran. Con el valor del desplazamiento en el punto de comportamiento por demanda se puede calcular la probabilidad de daño para cada estado como la diferencia entre las curvas de fragilidad.

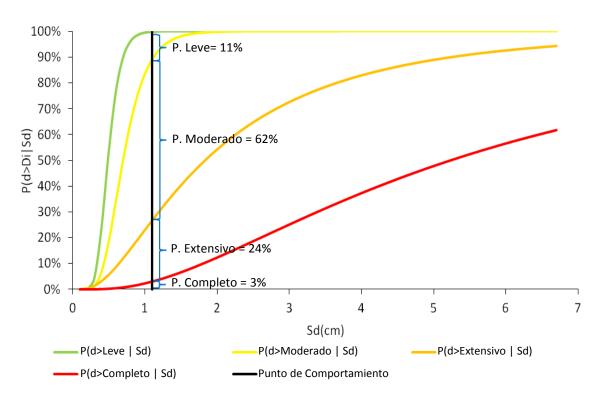


Figura 24. Determinación de las probabilidades de daño del edificio principal del Espitau.

La Figura 25 muestra las probabilidades de daño obtenidas para los tres edificios del Espitau. Para los 3 edificios la probabilidad más alta corresponde al grado de daño 2

asociado a daños moderados. La segunda probabilidad más alta corresponde al grado de daño 3 implicando que los daños podrían llegar a ser extensivos. Las probabilidades de observar daño completo son bajas para los 3 edificios pero mayores que las probabilidades de observar daño nulo.

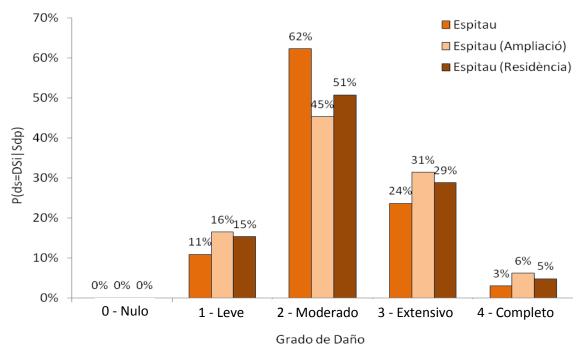


Figura 25. Probabilidad de daño de los edificios del Espitau para un periodo de 475 años.

Para determinar el grado de daño medio, GDM, esperado para cada una de los edificios se estima la suma de los estados de daño ponderados por su correspondiente probabilidad de daño como se muestran en la Ecuación 7. La Tabla 14 muestra el grado de daño medio obtenido para cada uno de los edificios del Espitau de Val d'Aran. Los 3 edificios rondan el grado de daño 2, asociado a daños moderados, que es el que mayor probabilidad de daño presentaba.

$$GDM = 0 * P[ds > Nulo | Sd_p] + 1 * P[ds > Leve | Sd_p] + 2 * P[ds > Moderado | Sd_p]$$

$$+ 3 * P[ds > Extensivo | Sd_p] + 4 * P[ds > Completo | Sd_p]$$

$$(7)$$

 $10^{-1} [as > Extensive | oa_p] | 4^{-1} [as > complete | oa_p]$

	Grado de Daño Medio		
Edificio	475 años	975 años	
Espitau	2.2	2.3	
Ampliación Espitau	2.3	2.5	
Residencia Espitau	2.2	2.4	

Tabla 14. Grado de daño medio para cada edificio del Espitau.

4.7 Evaluación de la seguridad sísmica según criterios del Comité Visión 2000

La seguridad sísmica de los edificios se evalúa aplicando los criterios de comportamiento sísmico del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) tal como recomendó Valcárcel (2013) y que se presentaron en la Tabla 5. La Figura 30 muestra la aplicación de estos criterios a los 3 edificios del Espitau Ninguno de los edificios cumple con el criterio de Operatividad (PR=475 años) por lo que se verían afectados sus servicios esenciales. Por otro lado, todos cumplen con el de Seguridad de la Vida (PR=975 años) por lo que garantizarían la seguridad vital de sus ocupantes.

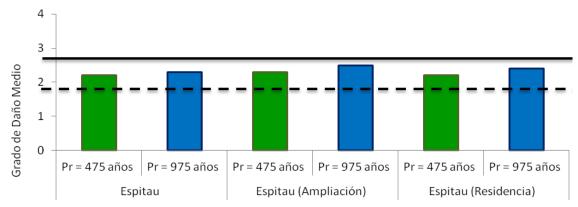


Figura 26. Aplicación de los criterios de seguridad sísmica del Comité Visión 2000.

4.8 Índice de pérdida económica, índice de funcionalidad económica y tiempo de recuperación

A continuación se presentan los resultados de la evaluación del índice de pérdida económica, del índice de funcionalidad y del tiempo de recuperación recomendados por Valcárcel (2013). Los resultados obtenidos para los periodos de retorno de 475 y 975 años se muestran en la Figura 27 y la Figura 28, respectivamente. Para un periodo de retorno de 475 años los tres edificios del Espitau podrían sufrir pérdidas económicas entre el 32 y el 39% del costo de reposición, su funcionalidad ronda entre 0.12 y 0.16, y el tiempo de recuperación es cercano a los 3 meses. En cambio para un periodo de retorno de 975 años, la pérdida económica varia entre el 34 y el 45%, la funcionalidad se sitúa entre 0.07 y 0.12 y el tiempo de recuperación es superior a los 3 meses.

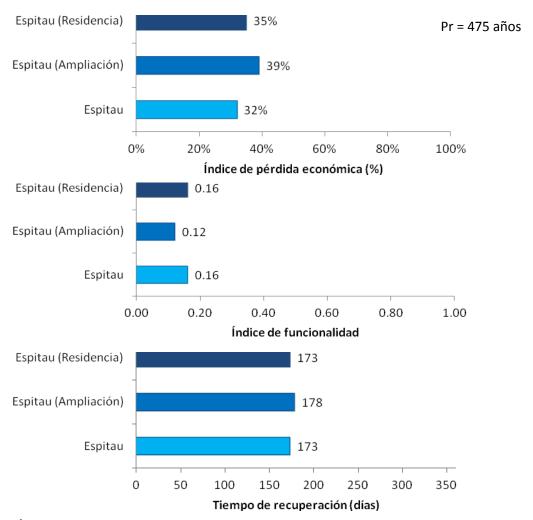


Figura 27. Índice de pérdida económica, índice de funcionalidad y tiempo de recuperación para un periodo de retorno de 475 años.

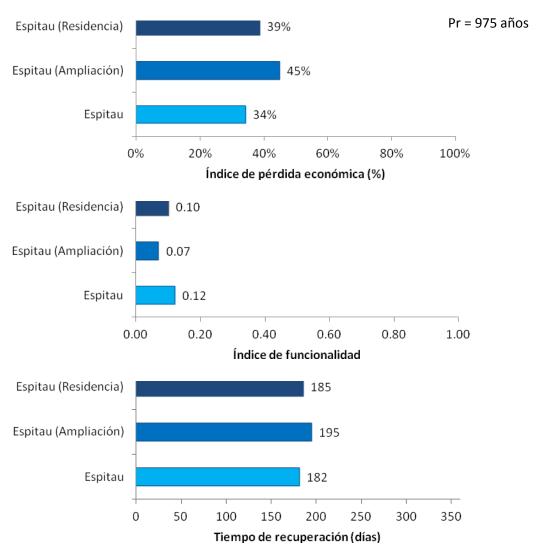


Figura 28. Índice de pérdida económica, índice de funcionalidad y tiempo de recuperación para un periodo de retorno de 975 años.

5 Evaluación de la seguridad sísmica de los edificios de especial importancia de Val d'Aran

5.1 Introducción

Como parte de los objetivos del proyecto SISPYR se evaluó el riesgo y la seguridad sísmica de un conjunto de edificios de especial importancia seleccionados por el Consejo General de Val d'Aran (Valcárcel, 2013). La situación de la comarca de Val d'Aran se muestra en la Figura 29. Los resultados de estos análisis permiten priorizar el análisis y reducción de la vulnerabilidad de los edificios de especial importancia en la zona de estudio.

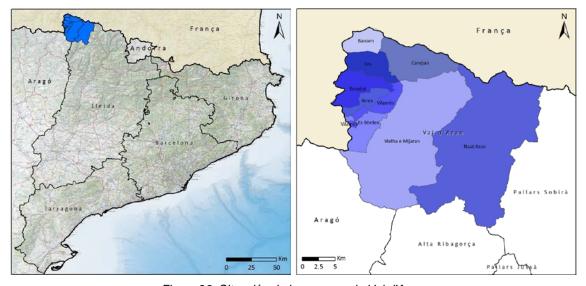


Figura 29. Situación de la comarca de Val d'Aran.

En esta región la peligrosidad sísmica es moderada. En la comarca del Valle de Arán han ocurrido eventos de intensidad VIII en la escala MSK, siendo las más altas en toda la zona (IGC, 2012). En la Figura 30 se observan los valores medios de la aceleración pico del terreno (PGA) para un escenario de 475 años obtenidos por Geoter (2008). En la Comarca del Valle de Arán, el PGA esperado es del orden de 115 cm/s2.

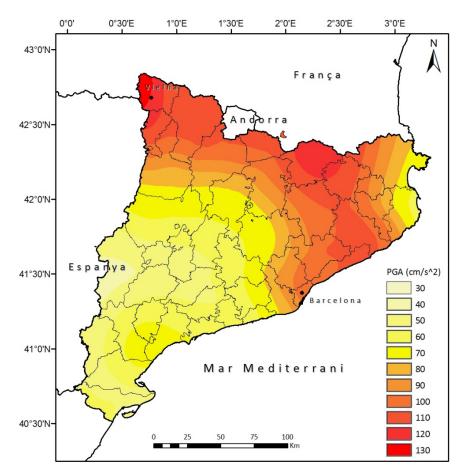


Figura 30. Mapa de aceleraciones máximas para un período de retorno de 475 años (Geoter, 2008).

5.2 Edificios de especial importancia de Val d'Aran

Con el apoyo de representantes del Consejo General de Arán y de responsables de protección civil de la zona, Valcárcel (2013) y Rodríguez (2010) realizaron una campaña de inspección visual rápida de los edificios de especial importancia seleccionados y recopilaron toda la información disponible sobre los mismos con el fin de complementar el formulario de evaluación de la vulnerabilidad para cada uno de ellos.

La Tabla 15 muestra los nombres de los 40 edificios inspeccionados. Algunas instituciones constan de varios edificios como por ejemplo el Consejo General de Aran que consta de dos edificios y por eso en el análisis se consideran como dos edificios independientes. La ubicación de los edificios estudiados se muestra en la Figura 31. La Figura 32 muestra la distribución municipal de los edificios de especial importancia analizados. Cerca del 50% de los edificios de especial importancia están localizados en el municipio de Vielha e Mijaran al ser esta la capital de la comarca de Val d'Aran.

Tabla 15. Edificios de especial importancia de Val d'Aran.

Edificios de especial importancia de Val d'Aran Conselh Generau D'Aran (1/2) IES d'Aran (Juan Marc) Conselh Generau D'Aran (2/2) Polideportivo - Vielha e Mijaran Espitau Val d'Aran (1/3) Antiguo polideportivo - Vielha e Mijaran Espitau Val d'Aran (residencia) (2/3) Parc de Bombers Voluntaris de Les Espitau Val d'Aran (ampliación) (3/3) Policia Nacional Parc de Bombers Voluntaris de Vielha e Mijaran Ajuntament de Naut Aran - CAP de Salardu Comissaria de la Policia de la Generalitat - Mossos d'Esquadra CEIP de Salardú - Escola Ruda - ZER Val d'Aran Guardia Civil de Vielha e Mijaran Polideportivo Salardú Ajuntament de Bossòst - EEI Albergue - EFTE (Centre Públic de Tècnics Esportius era Val d'Aran) Polideportivo Bossòst **CEIP Loseron** CFIP Sant Martí CEIP Estudi Alejandro Casona (1/2) CEIP Estudi Alejandro Casona (2/2) **CEIP Eth Roser** Polideportivo Les **CEIP Casteth Leon** Parc de Bombers Voluntaris de Bossòst (1/2) Arxiu històric Aran Parc de Bombers Voluntaris de Bossòst (2/2) EEI Municipal - Escola Mairau Era Cunhera Supermercado Boya Palau de gel Supermercado Caprabo Dispensari-CAP Arties Ajuntament de Vielha e Mijaran Dispensari-CAP Bossòst CEIP Garona (nou) Ajuntament Les

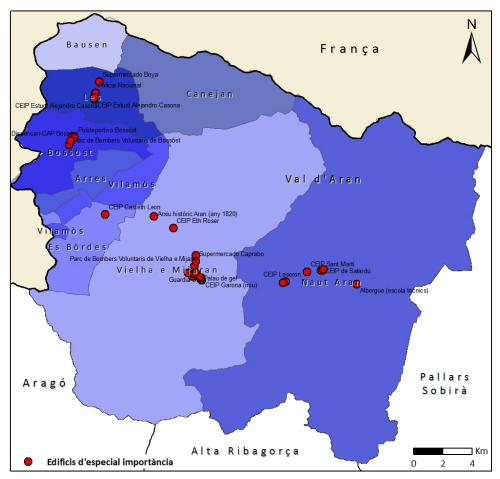


Figura 31. Ubicación de los edificios de especial importancia.

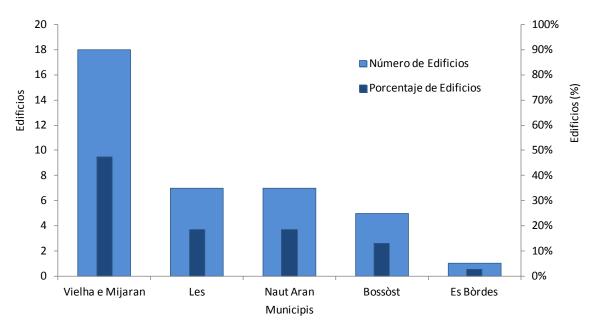


Figura 32. Distribución municipal de los edificios de especial importancia.

5.3 Descripción del conjunto de edificios de especial importancia de Val d'Aran

A continuación se describe el conjunto de los edificios de especial importancia de la Val d'Aran en función de los siguientes parámetros: tipología estructural, periodo de construcción, número de plantas, irregularidad en planta y elevación, y tipo de uso.

5.3.1 Tipologia estructural

Mediante la aplicación del formulario para la evaluación dela vulnerabilidad, Valcárcel (2013) determinó la tipología estructural de cada uno de los edificios de especial importancia considerados. La Figura 33 muestra la distribución de los edificios de especial importancia en función de la tipología estructural asignada por Valcárcel (2013). Como se puede observar predominan las estructuras de mampostería con un 55.3% y le siguen las estructuras de hormigón armado con un 23.7%. En menor porcentaje también están presentes las estructuras de acero y alguna de madera.

5.3.2 Periodo de Construcción

El periodo de construcción del edificio revela la normativa que se usó en el momento de su diseño y construcción por lo que nos da una indicación de cuan preparada está la estructura para soportar un evento sísmico.

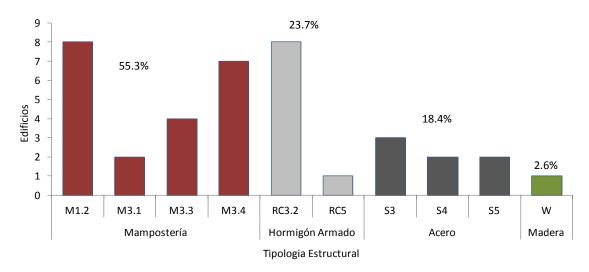


Figura 33. Distribución de los edificios de especial importancia según su tipología estructural.

La Tabla 16 presenta los periodos constructivos identificados por Valcácel (2013) para Cataluña, la normativa sismorresistente asociada a cada periodo, así como el numero y porcentaje de los edificios de especial importancia de la comarca de Val d'Aran asociados a cada periodo. Des esta información se desprende que el 42.1% de este conjunto de edificios se construyó antes del 1962 por lo que este conjunto de edificios fue diseñado sin considerar los posibles efectos sísmicos. Para un 10.5% de los edificios se desconoce el año de construcción.

Tabla 16. Número y porcentaje de edificios en función del su período de construcción.

Periodo de Construcción	Norma Sísmica Aplicable	Número de Edificios	Porcentaje de Edificios
< 1962	Sin norma	16	42.1%
1975 - 1994	PDS-1 1974	9	23.7%
1995 - 2002	NCSE-94	5	13.2%
> 2002	NCSE-02	4	10.5%
Sin información	-	4	10.5%

Para el restante 47.4%, construidos entre 1962 y 2002, podría pensarse que sí consideró algún tipo de norma sismorresistente al momento de su diseño y construcción pero Valcárcel (2013) aclara que antes del 2002 las normativas sísmicas se consideraban como recomendaciones y no de obligatorio cumplimiento para algunos municipios del Valle de Arán. Por lo tanto no se puede afirmar que los edificios construidos hasta 2002 (cerca del 37%) tengan requerimientos sismorresistentes. Solo

el 11% construido después se 2002 se puede considerar como construidos con normas sismorresistentes.

La Figura 34 se presenta el número de edificios según tipología estructural y periodo de construcción identificados por Valcárcel (2013). Se observa que la mayoría de los edificios de muros de piedra, así como también los de muros de mampostería fueron construidos antes de 1962. En años posteriores se presentan en mayor proporción edificios de hormigón armado y estructuras metálicas. Si bien los edificios en su mayoría han tenido modificaciones durante su vida útil, éstas no se han desarrollado para reducir su vulnerabilidad (Valcárcel, 2013).

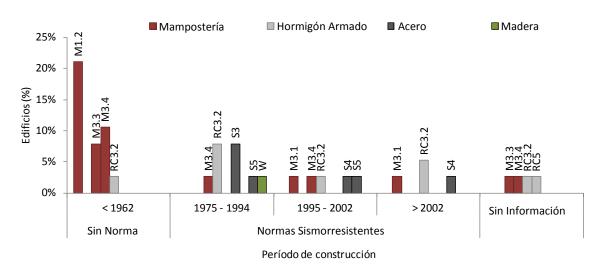


Figura 34. Distribución de los edificios de especial importancia según su tipología estructural y el periodo de construcción.

5.3.3 Número de Plantas

El número y porcentaje de los edificios de importancia especial según el número de plantas sobre rasante se muestra en la Figura 35. Se observa que la mayoría de las estructuras, casi el 90%, tienen cuatro plantas o menos. Por lo tanto, la mayoría de los edificios estarán clasificados en tipologías de mediana y baja altura. De estos resultados debe tenerse en cuenta que los polideportivos son considerados como edificios de una sola planta, no obstante, sus alturas son mayores a las típicas de un edificio de pilares y forjados de hormigón o de muros de mampostería.

5.3.4 Irregularidad en planta y altura

En la Figura 36 se presentan el número y el porcentaje de los edificios de especial importancia según su calificación por irregularidad en altura y por irregularidad en planta según los datos recopilados por Valcárcel (2013). El 60% se calificó con irregularidad en altura baja, el 20% con irregularidad en altura media y el 20% con irregularidad en altura alta.

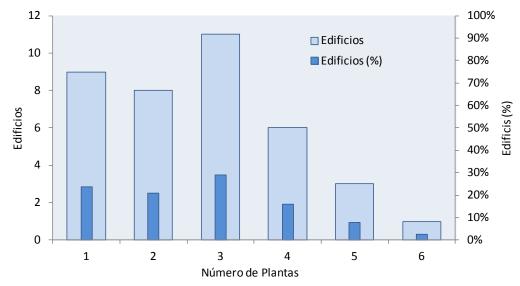


Figura 35. Distribución de los edificios de especial importancia según el número de plantas.

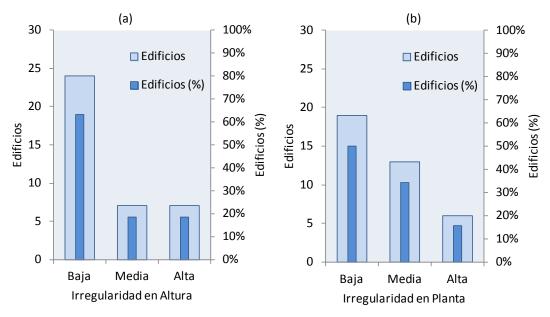


Figura 36. Distribución de los edificios de especial importancia según (a) la irregularidad en altura y (b) la irregularidad en planta.

Al analizar los datos de la irregularidad en planta, cerca del 50% de los edificios tienen plantas rectangulares, para los cuales se considera que su irregularidad en planta es baja; cerca del 32% se califica con irregularidad en planta media y el 18% restante con irregularidad en planta alta.

5.3.5 Otros detalles estructurales

Otros detalles estructurales importantes para evaluar la vulnerabilidad de los edificios esenciales son las reformas estructurales que han sufrido estos edificios, la posibilidad de golpeteo y la existencia de pilares cortos, muros con demasiadas aperturas y/o fisuras que puedan existir en elementos estructurales.

Un 35% de los edificios esenciales de la comarca de Val d'Aran han realizado obras para el mantenimiento y conservación de los edificios, para adecuar sus espacios para el funcionamiento de las instituciones, así como para preservar su valor cultural y patrimonial. Por ejemplo, de los edificios de administración de gobierno, todos han tenido intervenciones de este tipo. Las intervenciones para reparar edificios esenciales son un caso poco frecuente, que en esta muestra solo representa un 5% y en ningún caso está relacionado con daños producidos por eventos sísmicos.

En relación a la posibilidad de golpeteo, se observa que la mayoría de los edificios (29 de 40) no presentan posibilidad de golpeteo debido a que se encuentran aislados o lo suficientemente separados de los edificios contiguos. En el caso de edificios de pilares y forjados, sólo se identificaron dos casos de posible desarrollo de pilares cortos. En el caso de edificios de muros de carga, la mayoría tienen muros exteriores sólidos; se encuentran pocos casos de muros estructurales con demasiadas aberturas. En cuanto a los daños observados, unos 9 edificios de importancia especial de la Val d'Aran presentan fisuras en elementos estructurales, las cuales no han sido originados por eventos sísmicos.

5.3.6 Tipo de uso

Para complementar la descripción de los edificios de especial importancia de la comarca de Val d'Aran, la Figura 37 presenta la distribución de los edificios según su uso. Los edificios se han clasificado en centros educativos, centros comerciales y

edificios de espectáculos públicos, edificios relacionados a personal y equipos de ayuda, los relacionados a la administración del gobierno y los relacionados a la salud.

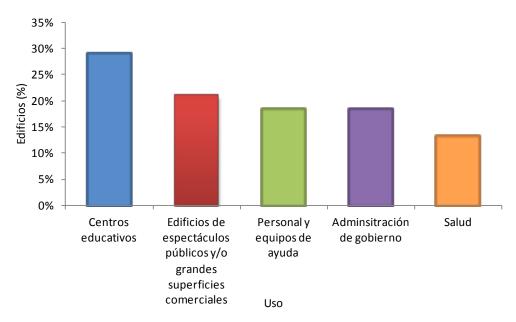


Figura 37. Distribución de los edificios de especial importancia según su uso.

La Figura 38 muestra la distribución de los edificios en función de su uso y de su tipología estructural. Los edificios para espectáculos públicos y/o grandes centros comerciales son estructuras metálicas o de hormigón armado. Los centros educativos, al igual que los de administración de gobierno y de personal de ayuda, son en su mayoría de muros de mampostería y de piedra; y en menor medida se encuentran edificios de hormigón armado. En el caso de los edificios de salud, se encuentran estructuras de hormigón armado y de mampostería.

La distribución de los edificios de importancia especial de la Val d'Aran en función del uso y del periodo de construcción se muestra en la Figura 39. La mayoría de los edificios de la administración de gobierno y de los centros educativos de la comarca se construyeron antes el 1962 cuando no se consideraban normas sísmicas en su diseño. Por el contrario, la mayoría de los edificios de importancia especial destinados a grandes superficies y edificios de espectáculos públicos se construyeron aplicando normas sismorresistentes. Algunos edificios relacionados a la salud y personal y equipos de ayudan también fueron construidos sin requerimientos antisísmicos.

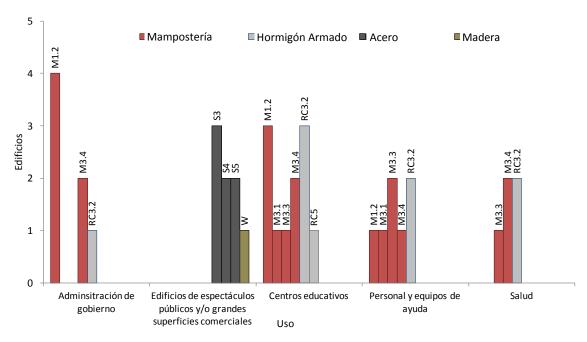


Figura 38. Distribución de los edificios de especial importancia según su tipología y uso.

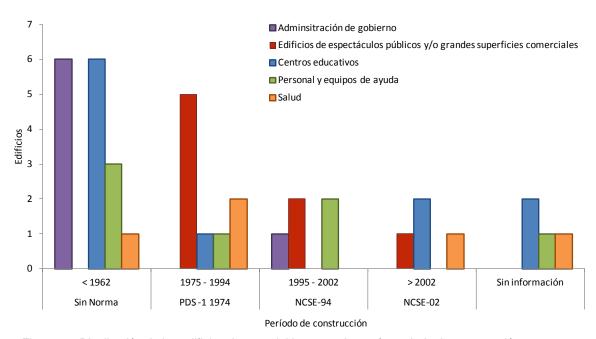


Figura 39. Distribución de los edificios de especial importancia según periodo de construcción y su uso.

5.4 Peligrosidad sísmica

Para obtener la demanda sísmica se adaptan las formas espectrales propuestas en el Eurocódigo 8 a los espectros de amenaza uniforme desarrollados por GEOTER (2008), para los periodos de retorno de 475 y 975 años. A su vez, para considerar los efectos de sitio, se utiliza la clasificación y caracterización de la respuesta sísmica de

los diferentes tipos de suelo obtenida en un estudio de mesozonación elaborado para Cataluña (IGC 2011). La Figura 40 muestra la mesozonación sísmica de la comarca de la Val d'Aran y la localización de los edificios de especial importancia (puntos azules). Como se puede observar en la Figura 41 más del 50% de los edificios están localizados en suelo tipo E, el tipo de suelo con mayor amplificación. Los edificios restantes se encuentran en suelos tipo C (32%) o tipo A (13%).

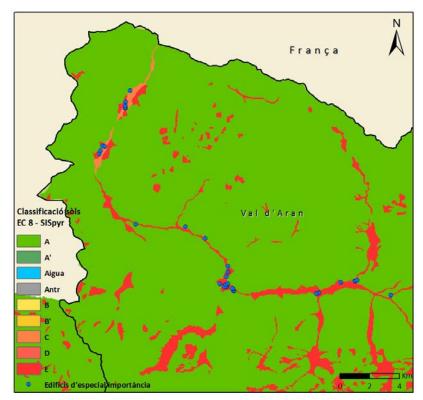


Figura 40. Mesozonación sísmica de la Val d'Aran.

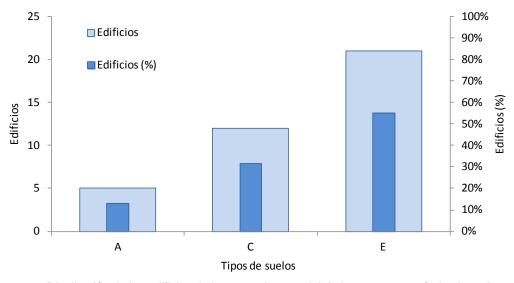


Figura 41. Distribución de los edificios de importancia especial de la comarca según la clase de suelo donde están situados.

La Figura 42 muestra el porcentaje de edificios en función del rango de PGA con efectos de suelo y del tipo de suelo en el que se encuentran para los periodos de retorno de 475 y 975 años. De esta figura se observa que casi un 90% de los edificios de especial importancia están expuestos a aceleraciones entre 0.16g y 0.22g para un periodo de retorno de 475 años, y entre 0.18g y 0.24g para un periodo de retorno de 975 años. Estos edificios corresponden a los situados en suelos tipo E i C, mientras que el 10% restante está expuesto a aceleraciones inferiores a 0.14g al estar ubicados en roca firme (suelo tipo A).

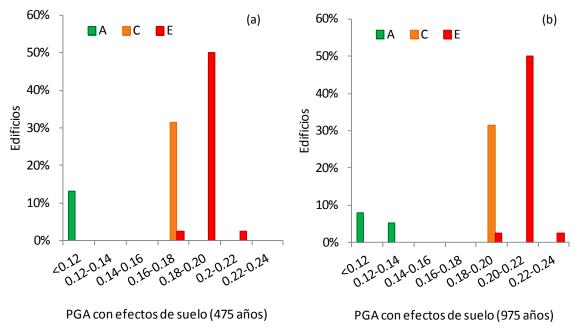


Figura 42. Distribución de los edificios de importancia especial de la comarca según el tipo de suelo y el rango de PGA con efectos de suelo para los periodos de retorno de 475 y 975 años.

5.5 Evaluación del grado de daño medio

Una vez identificado el tipo de suelo de cada edificio de especial importancia se le asigna el correspondiente espectro de demanda sísmica y mediante el método del espectro de capacidad se puede obtener el grado de daño medio esperado para cada uno de los periodos de retorno considerados. La Figura 43 muestra la distribución de los edificios de especial importancia según el grado de daño medio obtenido. Más del 60% de los edificios podrían sufrir daños entre moderados y extensivos para los periodos de retorno considerados al estar asociados a un grado de daño entre 2 y 3. Cabe destacar que para un periodo de retorno de 975 años, un 5% de los edificios estudiados pueden sufrir daños entre extensivos y completo (grado de daño medio >3).

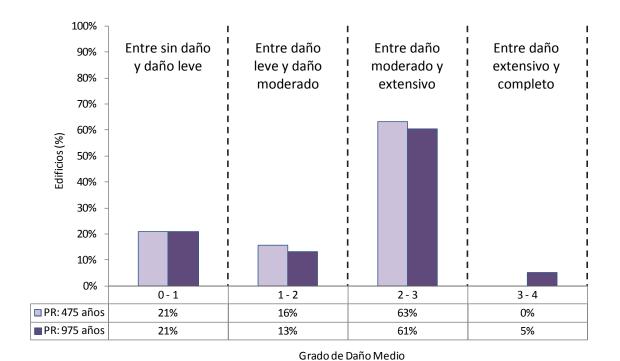


Figura 43. Distribución de los edificios de importancia especial de la comarca según el daño esperado para los periodos de retorno de 475 y 975 años.

5.6 Evaluación de la seguridad sísmica

La seguridad sísmica de los edificios de especial importancia de la comarca de la Val d'Aran se evalúa aplicando los criterios de comportamiento sísmico del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) que fueron expuestos en la sección 2.6 y que se presentaron en la Tabla 5. Para un periodo de retorno de 475 años los edificios de especial importancia deberían cumplir con el criterio *Operacional* y para el de 975 años deberían cumplir con el criterio de *Seguridad de la Vida*.

El criterio *Operacional*, requerido para un periodo de retorno de 475 años, implica que los edificios deben tener como máximo daños leves de carácter reparable porque es necesario que la estructura se pueda seguir ofreciendo los servicios más esenciales sin interrupción. Por lo que según, Valcárcel (2013) para cumplir con el criterio *Operacional*, los edificios de importancia especial deben tener un grado de daño medio inferior de 2 para un periodo de retorno de 475 años. Si se normaliza el grado de daño, este valor correspondería a 0.5 dado que el valor máximo del grado de daño considerado en esta metodología es 4.0.

La Figura 44 muestra la aplicación del criterio *Operacional* a los resultados del grado de daño medio para un periodo de retorno de 475 años para los edificios de importancia especial de la comarca de la Val d'Aran. La línea discontinua en la gráfica marca el límite correspondiente al grado de daño 2 indicando el límite del criterio *Operacional*. Un 37% (14 de 38) de los edificios de especial importancia cumplen con el criterio *Operacional* y por lo tanto podrían continuar funcionando con la interrupción de algunos de los servicios no esenciales.

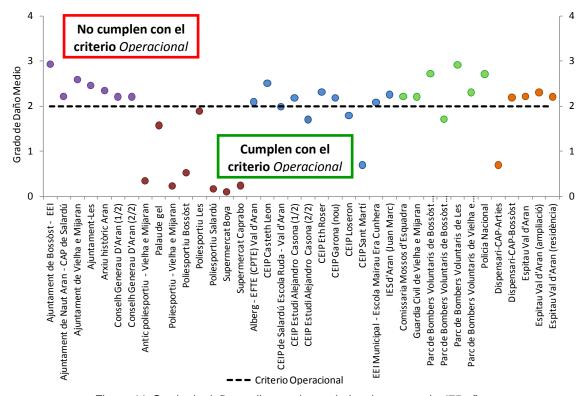


Figura 44. Grado de daño medio para los periodos de retorno de 475 años.

Al contrario los restantes 24 edificios (63%) no cumplen con el criterio *Operacional* y podrían sufrir interrupciones de los servicios esenciales que ofrecen o puede no ser una estructura segura para ser ocupada. Seria necesario evaluar más detalladamente la vulnerabilidad de la estructura para tomar medidas de mitigación de daños para asegurar que el daño de grado medio para estas estructuras sea menor para un periodo de retorno de 475 años.

El criterio Seguridad de la Vida, asociado a un periodo de retorno de 975 años, requiere que los edificios de especial importancia pueden sufrir daños moderados pero deben permanecer estables desde el punto de vista estructural porque es necesario que puedan garantizar la seguridad de la vida de sus ocupantes. Según Valcárcel

(2013) para cumplir con este criterio los edificios de importancia especial deben tener un grado de daño medio inferior de 2.8 (0.7 si es normalizado) para un periodo de retorno de 975 años.

Como se puede observar en la Figura 45, 34 de los 38 (89%) edificios de especial importancia de la comarca de la Val d'Aran cumplen con el criterio de *Seguridad de la Vida* por lo que podrían garantizar la seguridad de la vida de sus ocupantes para una peligrosidad asociada a un periodo de retorno de 975 años. Solo 4 de los edificios estudiados no cumplen con el criterio de Seguridad de la Vida y por lo tanto los daños podrían ser tan importantes como para poner en peligro la estabilidad de la estructura y poner en peligro la vida de sus ocupantes.

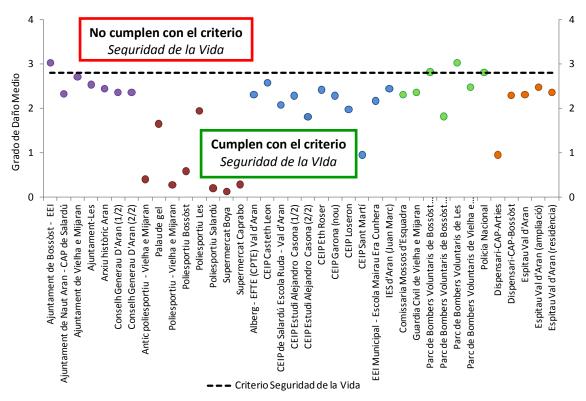


Figura 45. Grado de daño medio para los periodos de retorno de 975 años.

Para analizar los edificios que no cumplen con los criterios de comportamiento sísmico del Comité VISION 2000 se analizan los resultados del grado de daño de los edificios de especial importancia agrupados según su uso para los dos periodos de retorno considerados. Como se puede observar en la Figura 46, los 8 edificios clasificados como edificios de espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales cumplen con el criterio *Operacional* para un periodo de retorno de 475 años.

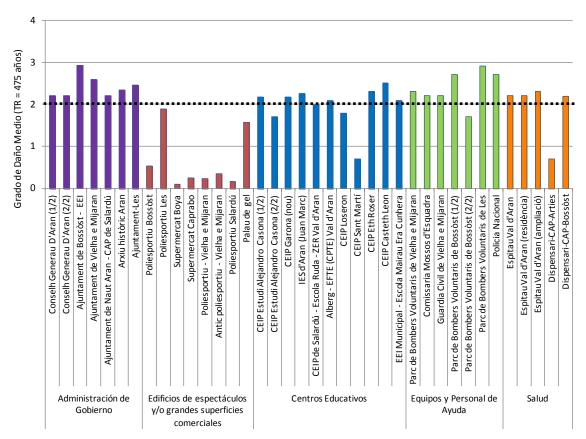


Figura 46. Grado de daño medio de los edificios de especial importancia según su uso para los periodos de retorno de 475 años y el criterio Operacional.

Los 6 restantes edificios que cumplen con el criterio *Operacional* para un periodo de retorno de 475 años corresponden un edificio de salud (Dispensario de Arties), un edificio de personal y equipos de ayuda (Bomberos Voluntarios de Bossòst) y 4 centros educativos (CEIP San Martí, CEIP Loseron, uno de los edificios del CEIP Estudi Alejandro Casona y el CEIP de Salardú). De tal manera todos los edificios relacionados con la administración de gobierno, casi todos los relacionados a la salud y el personal y equipos de ayuda y la mayoría de los centros educativos analizaos no cumplirían con el criterio *Operacional* teniendo que interrumpir sus servicios esenciales.

En la Figura 47 se puede observar que los 4 edificios que no cumplen con el criterio de Seguridad de la Vida para un periodo de retorno de 975 años corresponden a 3 edificios relacionados al personal y equipos de ayuda (Policia Nacional, los Bomberos Voluntarios de Les y uno de los edificios de los Bomberos Voluntarios de Bóssost) y a uno de la administración del gobierno (Ayuntamiento de Bòssost). Así que todos los edificios relacionados con la salud, centros educativos, los edificios de espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales y la mayoría de los edificios de personal

y equipos de ayuda, y de la administración del gobierno cumplen con el criterio de Seguridad de la Vida y por lo tanto podrían garantizar la seguridad de sus ocupantes.

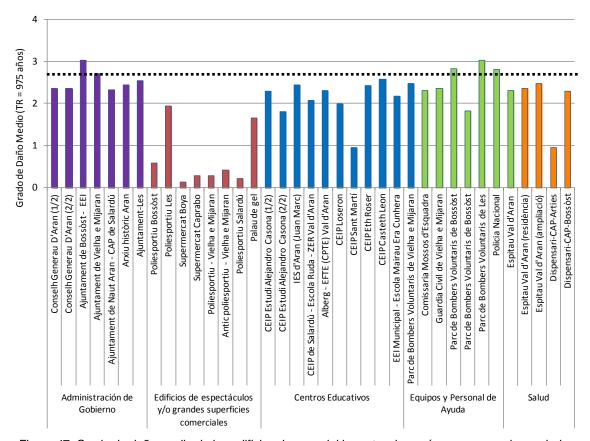


Figura 47. Grado de daño medio de los edificios de especial importancia según su uso para los periodos de retorno de 975 años y el criterio Seguridad de la Vida.

5.7 Evaluación del índice de pérdida económica

Además del grado de daño medio, la priorización del análisis y reducción de la vulnerabilidad puede fundamentarse en criterios asociados con la pérdida económica, la pérdida de funcionalidad y el tiempo de recuperación de la infraestructura. Estos valores pueden estimarse siguiendo las metodologías presentadas en la sección 2.7 a partir de la matriz de probabilidad de daño y de los valores de la pérdida en porcentaje asociados a cada estado de daño.

La Figura 48 presenta el índice de pérdida económica estimado para cada edificio y periodo de retorno considerado. Se puede observar que el mayor índice de pérdida económica para el periodo de retorno de 475 años corresponde a un 68.9% del valor

de reposición del edificio, mientras que para el periodo de retorno de 975 años es de un 77.7% del valor de reposición del edificio.

Los edificios con un índice de pérdida mayor al 40% para un periodo de retorno de 475 años corresponden al de bomberos voluntarios de Les, uno de los edificios de los bomberos de Bossòst, el ayuntamiento de Bossòst y el edificios de la Policía Nacional. Para un periodo de retorno de 975 años, a estos 4 edificios se le añaden los bomberos y el ayuntamiento de Vielha i Mijaran, y el ayuntamiento de Les.

5.8 Evaluación del índice de funcionalidad

De forma similar, el índice de funcionalidad se estimó para cada edificio, considerando los resultados del grado de daño medio y los criterios de comportamiento sugeridos en el documento FEMA 396 (2003), tal como se describe en la sección 2.8. En la Figura 49 se presenta el índice de funcionalidad estimado para cada instalación.

Como se puede observar, a pesar de que el grado de daño promedio obtenido es moderado, la funcionalidad de los edificios se reduce considerablemente. El 79% de los edificios de especial importancia analizados presentan índices de funcionalidad inferiores al 40% para ambos periodos de retorno considerados. Unos 8 edificios (21%), que en su mayoría corresponden a edificios clasificados como edificios de espectáculos públicos y grandes superficies comerciales, muestran índices de funcionalidad superiores al 80% para ambos periodos de retorno

5.9 Evaluación del índice de recuperación

El tiempo esperado de recuperación se estimó siguiendo los planteamientos del FEMA 227 (FEMA 1992), como se describe en la sección 2.8. En la Figura 50 se presenta el tiempo de recuperación estimado para cada instalación. Se observa que cerca del 30% de los edificios tienen un periodo de recuperación entre 0 y 150 días, cerca del 55% tienen un periodo de recuperación entre 150 y 200 días y aproximadamente un 20% tienen un periodo de recuperación mayor a 200 días.

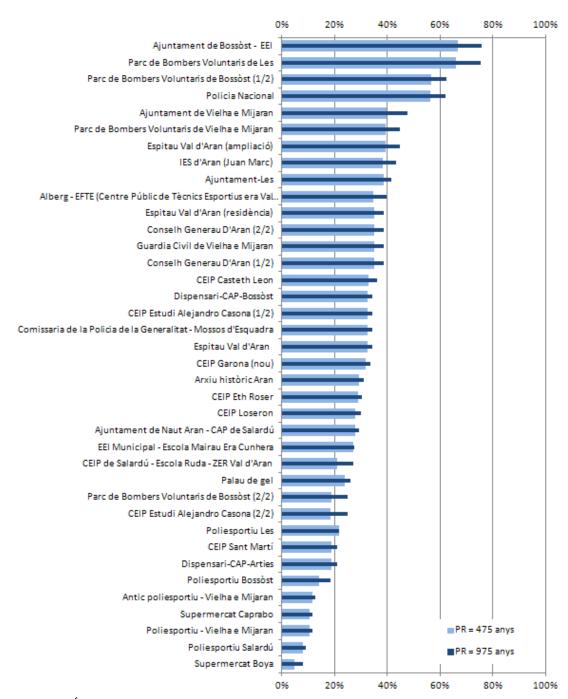


Figura 48. Índice de pérdida económica estimado para cada edificio de especial importancia según los periodos de retorno de 475 y 975 años.

5.10 Resumen y discusión

En este Capítulo se han presentado los resultados de la evaluación de la seguridad de edificios de importancia especial del Valle de Arán. Para esta evaluación, se llevaron a cabo inspecciones visuales rápidas en una muestra significativa de edificios de salud, de enseñanza, de personal y equipos de ayuda, de edificios para espectáculos

públicos y/o grandes superficies comerciales, de administración de gobierno y monumentos históricos. En estas inspecciones se recolectó información general de las instalaciones en cuanto a su ubicación y funciones, así como datos relacionados con su tipología estructural y otros detalles estructurales. Para las inspecciones se usaron y adaptaron los formularios de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales y centros educativos desarrollados por la UPC en conjunto con el IGC.

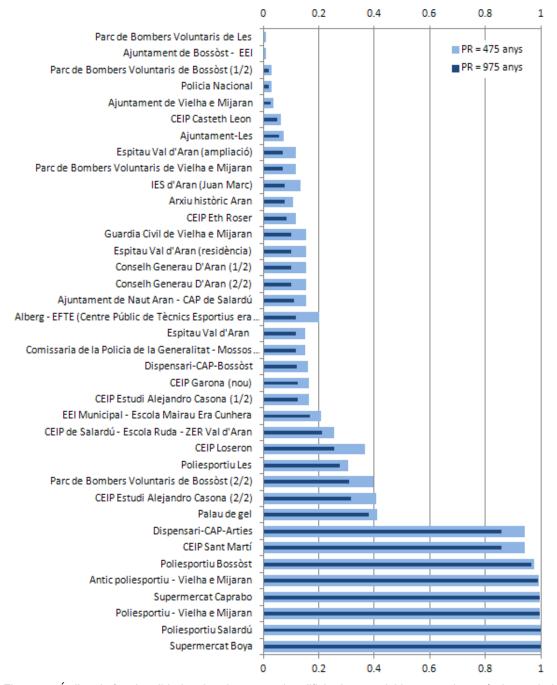


Figura 49. Índice de funcionalidad estimado para cada edificio de especial importancia según los periodos de retorno de 475 y 975 años.

De los resultados de la inspección, se concluye que el 55% son estructuras de mampostería no reforzada, 24% de edificios de hormigón armado y 17% de edificios metálicos. Los edificios restantes (3%) son estructuras de madera. Aproximadamente el 70% de los edificios no tienen más de tres niveles sobre rasante; por esta razón, la mayoría se clasifica como edificios bajos.

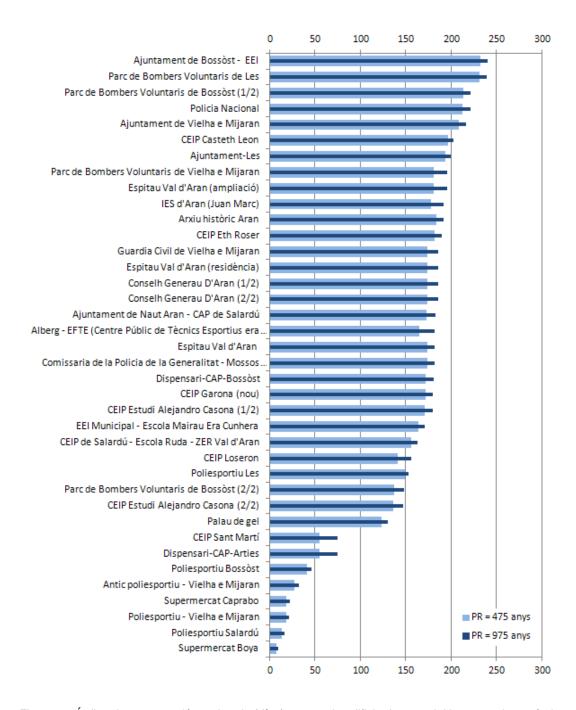


Figura 50. Índice de recuperación estimado (días) para cada edificio de especial importancia según los periodos de retorno de 475 y 975 años.

Cerca del 42% de los edificios, en especial escuelas de educación primaria y ayuntamientos, fueron construidos antes de 1962 sin requerimientos sismoresistentes. Dado que antes del año 2002 las normativas sísmicas se consideraban como recomendaciones en algunos municipios del Valle de Arán, no se puede afirmar que los edificios construidos hasta dicho año (cerca del 37%) tengan requerimientos sismoresistentes. Sólo el 11% de los edificios han sido construidos con posterioridad al 2002, por lo tanto se espera que incorporen en su diseño los requerimientos de la norma NCSE-02. Si bien los edificios en su mayoría han tenido modificaciones durante su vida útil, estas no se han desarrollado para reducir su vulnerabilidad sísmica. Así, no se han presentado casos de intervenciones estructurales que actualicen la seguridad de los edificios a los requerimientos de las normativas de construcción más recientes.

En cuanto a otros detalles estructurales, cerca del 50% de los edificios tienen plantas rectangulares, en los cuales se considera que su irregularidad es baja; alrededor del 32% se califica con irregularidad en planta media y el 18% restante con alta. Respecto a la irregularidad en altura, el 60% se calificó con irregularidad baja, el 20% con irregularidad media y el 20% con alta. En relación a la posibilidad de golpeteo, se observa que la mayoría de los edificios no presentan esta deficiencia debido a que se encuentran aislados o lo suficientemente separados de los edificios contiguos. En el caso de edificios de pilares y forjados, sólo se identificaron dos casos de posible desarrollo de pilares cortos.

De la clasificación de los edificios según su uso y tipologías estructurales, se concluye que los edificios para espectáculos públicos y/o grandes centros comerciales son estructuras de pórticos metálicos o de pilares y forjados de hormigón armado. Los edificios de enseñanza, al igual que los de administración de gobierno y de personal de ayuda, son en su mayoría de muros de mampostería y de piedra; las escuelas más recientes y de mayor número de alumnos tienen estructura de pilares y forjados de hormigón armado. En el caso de los edificios de salud, hay estructuras de hormigón armado y de mampostería.

Para estimar la acción sísmica considerando efectos de sitio, se adoptaron las formas espectrales del Eurocódigo 8 (tipo II) de acuerdo con los resultados de un estudio de mesozonación realizado en Cataluña (GEOTER 2008). Cerca del 13% de las instalaciones se encuentran en roca firme (suelo tipo A), un 32% en suelo tipo C y un

55% en suelo tipo E. Los edificios ubicados en roca firme están expuestos a PGA's que varían entre 0.10 g y 0.12g para periodos de retorno de 475 años y que pueden aumentar hasta 0.14g para un periodo de retorno de 975 años. Para periodos de retorno de 975 años, los edificios están expuestos a valores de PGA's de entre 0.18 g y 0.24 g. Mientras que para los edificios localizados en suelos tipo E se exponen a valores del PGA que varían entre 0.16 y 0.22g para un periodo de retorno de 475 años, y entre 0.18 y 0.24g para un periodo de 975 años. Para aquellos afectados por suelos tipo C el PGA varían entre 0.16 y 0.18g y entre 0.18 y 0.20g, para los periodos de retorno de 475 y 975 años, respectivamente.

Una vez conocidas los espectros de capacidad y los espectros de demanda correspondientes a cada edificio, el daño esperado se evalúo siguiendo el método simplificado de espectros de capacidad propuesto en el proyecto RISK UE. Considerando un periodo de retorno de 475 años, cerca del 37% de los edificios tienen un grado de daño medio menor a 2, el cual representa el estado de daño moderado. Para los demás edificios, el daño varía entre 2 y 3.2 (entre moderado y extensivo). Al considerar los estándares de seguridad sugeridos por el Comité VISION 2000 para un periodo de retorno de 475 años, los edificios esenciales deben tener un daño menor que moderado (nivel de comportamiento operacional). De esta manera, los edificios con un grado de daño medio mayor que 2 , un 63%, no cumplen tal requisito.

Para el análisis del escenario con un periodo de retorno de 975 años, se ha estimado que cerca del 11% de los edificios tienen un grado de daño mayor a 2.8, cercano al estado de daño extensivo. Al adoptar los estándares de seguridad sugeridos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995) para un periodo de retorno de 975 años, se considera que este porcentaje de edificios no cumplen con el nivel de comportamiento de seguridad de la vida.

De la comparación de los valores del grado de daño medio esperado entre los diferentes tipos de edificios, se observó que las instalaciones de personal y equipos de ayuda, así como los edificios de gobierno y de patrimonio histórico, son los que tienen, en conjunto, mayores daños esperados.

Como complemento al análisis de seguridad, se realizaron estimaciones del índice de pérdida económica, del índice de funcionalidad y del tiempo de recuperación estimado de acuerdo a los daños esperados del edificio. De estos resultados se concluye que el

promedio de las instalaciones, para un periodo de retorno de 475 años, tienen un índice de pérdida económica del 30% de su coste de reposición. En cuanto a su funcionalidad, se observa que se cerca del 80% tienen un índice de funcionalidad menor a 0.5. Por último, un 34% de las instalaciones tienen un periodo de recuperación entre 0 y 150 días. El 53% tienen un periodo de recuperación entre 150 y 200 días. Alrededor del 13% tienen un periodo de recuperación mayor a 200 días.

Así, los resultados del análisis del grado de daño medio esperado, la evaluación de la seguridad de los edificios y las estimaciones de pérdidas económicas, pérdidas de funcionalidad y tiempos de recuperación pueden permitir establecer prioridades para el análisis y reducción de la vulnerabilidad de acuerdo a los daños estimados y a los requisitos de seguridad adoptados. En este sentido, destacan los edificios de lo bomberos voluntarios de Les y Bòssot, el edificio de la Policía Nacional y el ayuntmaiento de Bòssost que son los que muestran un comportamiento sísmico más problemático. Al no cumplir incluso con el criterio de Seguridad de la Vida.

6 Evaluación de la seguridad sísmica de centros educativos de la provincia de Girona

6.1 Introducción

Como parte de los objetivos del proyecto SISPYR también se evaluó el riesgo y la seguridad sísmica de un conjunto de centros escolares de las capitales de comarca de la provincia de Girona seleccionados junto a personal del Departament d'Ensenyament. La situación de la comarca de Girona se muestra en la Figura 51. Los resultados de estos análisis permiten priorizar el análisis y reducción de la vulnerabilidad de los centros de escolares al identificar aquellos que puedan resultar más afectados tras un terremoto en la zona de estudio.

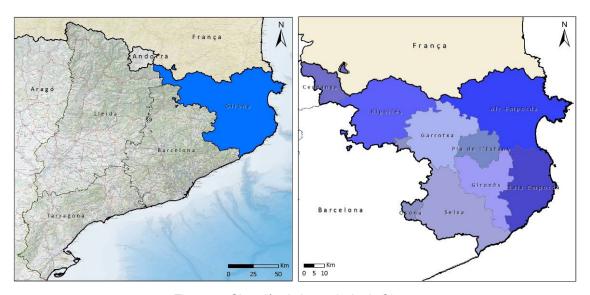


Figura 51. Situación de la provincia de Girona.

6.2 Centros escolares de las capitales de la provincia de Girona

Con el apoyo del Departament d'Ensenyament, Valcárcel (2013) dispuso de planos estructurales, arquitectónicos, memorias de construcción y de obras de ampliación y reforma, entre otros documentos, para cada uno de los 117 edificios que forman los 54 centros escolares seleccionados. A partir de estos datos Valcárcel (2013) realizó una caracterización del conjunto de edificios según sus propiedades estructurales,

empleando los formularios de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos. La Tabla 17 muestra los 53 centros escolares. Algunas instituciones constan de varios edificios como por ejemplo la Escuela Taialà que consta de 7 edificios y por eso en el análisis se consideran como 7 edificios independientes.

Tabla 17. Edificios de los centros escolares de las capitales de la provincia de Girona.

Municipio	Nombre		Municipio
Banyoles	Escola Baldiri Reixac	Escola Annexa - Joan Puigbert (3)	
	Escola La Draga (2)	Escola El Bosc de la Pabordia	
	Institut Josep Brugulat (3)	Escola Carme Auguet	
	Institut Pere Alsius i Torrent (2)	Escola Cassià Costal (2)	
	Institut Pla de l'Estany (2)	Escola Josep Dalmau i Carles	
La Bisbal de l'Empordà	Escola Joan de Margarit	Escola Domeny (3)	
	Escola Mas Clarà (3)	Escola Eiximenis	
	Institut La Bisbal (2)	Escola Font de la Pólvora (3)	
Alp	Escola Bac de Cerdanya	Escola Joan Bruguera (3)	
Olot	Institut La Garrotxa (4)	Escola Mare de Déu del Mont	
	Institut Montsacopa (2)	Escola Migdia (2)	
Ribes de Freser	SES Joan Triadu (2)	Escola Montjuïc	Girona
Ripoll	Institut Abat Oliba (2)	Escola Pericot	
	Institut Abat Oliba (2)	Escola Pla de Girona (3)	
Figueres	Escola Amistat (3)	Escola Santa Eugènia	
	Escola Anicet de Pagès i de Puig	Escola Taialà (7)	
	Escola Carme Guash	Escola de Vila-roja	
	Escola Joaquim Cusí (2)	Escola Marta Mata (3)	
	Escola Josep Pallach (3)	Institut Carles Rahola i Llorens (2)	
	Escola Parc de les Aigües (4)	Institut Montilivi (4)	
	Escola Salvador Dalí (2)	Institut Santiago Sobrequés i Vidal (2)	
	Escola Sant Pau (2)	Institut Santa Eugènia (3)	
	Institut Alexandre Deulofeu (2)	Institut Jaume Vicens Vives (4)	
	IES Cendrassos (4)	Institut de Santa Coloma de Farners (2)	
	IES Narcís Monturiol (3)	Escola Sant Salvador D'horta	Santa
	Institut Olivar Gran (2)	Escola Castell de Farners (2)	Coloma de Farners
	Institut Ramón Muntaner		

La Figura 52 muestra la distribución municipal de los edificios de especial importancia analizados. El 45% de los edificios de los centros escolares estudiados están localizados en el municipio de Girona y los municipios de Figueres y Banyoles también destacan por su número de edificios escolares. A continuación se describe el conjunto de los edificios según sus características principales.

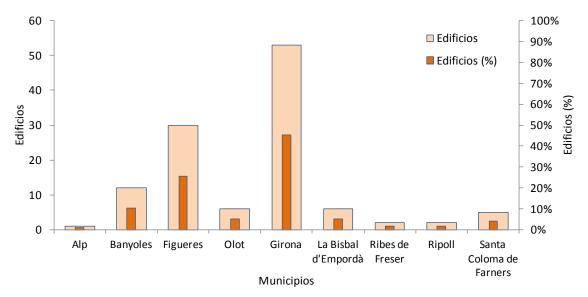


Figura 52. Distribución municipal de los centros escolares estudiados.

6.2.1 Tipologia estructural

Valcárcel (2013) determinó la tipología estructural de cada uno de los edificios de los centros escolares considerados. La Figura 53 muestra la distribución de los edificios de especial importancia en función de la tipología estructural asignada por Valcárcel (2013). Como se puede observar predominan las estructuras de hormigón armado con un 70.0% y las estructuras restantes se reparten a partes casi iguales entre estructuras de mampostería y aquellas de acero.

6.2.2 Periodo de Construcción

El periodo de construcción del edificio revela la normativa que se usó en el momento de su diseño y construcción por lo que nos da una indicación de cuan preparada está la estructura para soportar un evento sísmico. La Tabla 18 presenta los periodos constructivos identificados para Cataluña, la normativa sismorresistente asociada a cada periodo, así como el numero y porcentaje de los edificios de los centros escolares seleccionados de la provincia de Girona asociados a cada periodo. De esta información se desprende que solo el 9.4% de este conjunto de edificios se construyó antes del 1962 sin considerar los posibles efectos sísmicos. Mientras que para el 88.9% si se consideró algún tipo de norma sismorresistente al momento de su diseño y construcción. El año de construcción solo se desconoce para un 1.7% de los edificios escolares analizados.

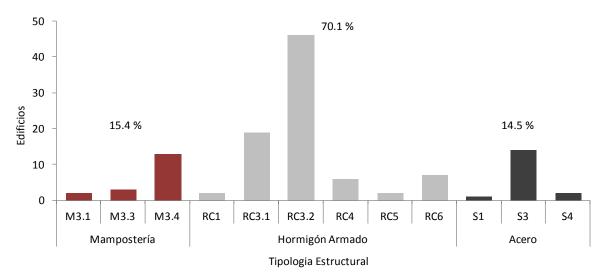


Figura 53. Distribución de los edificios de los centros escolares según su tipología estructural.

Tabla 18. Número y porcentaje de edificios de los centros escolares de la provincia de Girona en función del su período de construcción.

Periodo de Construcción	Norma Sísmica Aplicable	Número de Edificios	Porcentaje de Edificios
< 1962	Sin norma	11	9.4%
1962 - 1974	PDS-1 1974	13	11.1%
1975 - 1994	PDS-1 1974	42	35.9%
1995 - 2002	NCSE-94	7	6.0%
> 2002	NCSE-02	42	35.9%
Sin información	-	2	1.7%
	Total	117	100%

La Figura 54 se presenta el número de edificios según tipología estructural y periodo de construcción. Se observa que la mayoría de los edificios construidos antes de 1962 corresponden a edificios de mampostería. En años posteriores se observa una mayor proporción edificios de hormigón armado y aparecen algunas estructuras metálicas.

6.2.3 Número de Plantas

El número y porcentaje de los edificios de importancia especial según el número de plantas sobre rasante se muestra en la Figura 55. Se observa que la mayoría de las estructuras, el 88%, tienen tres plantas o menos. Por lo tanto, la mayoría de los edificios de los centros escolares estudiados son de baja altura y solo un 12% son de mediana altura.

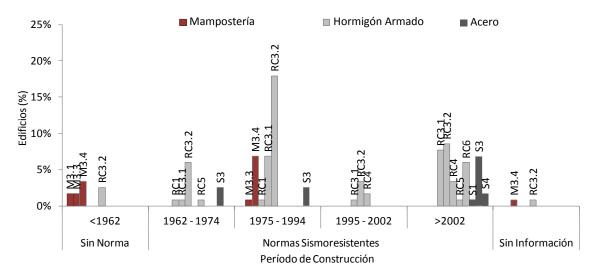


Figura 54. Distribución de los edificios de los centros escolares según su tipología estructural y el periodo de construcción.

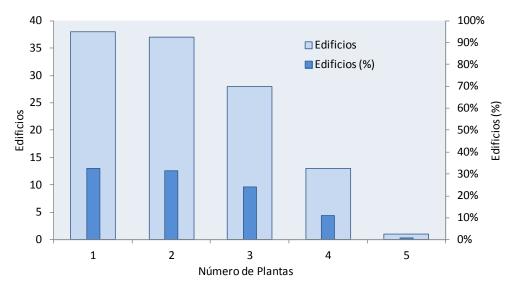


Figura 55. Distribución de los edificios de los centros escolares estudiados según el número de plantas.

6.3 Peligrosidad sísmica

En esta región la peligrosidad sísmica es moderada. En la Figura 56 se observan los valores medios de la aceleración pico del terreno (PGA) para un escenario de 475 años obtenidos por Geoter (2008). Como se puede observar en la provincia de Girona se pueden esperar valores del PGA esperado entre 37 y 115 cm/s².

La Figura 57 muestra la mesozonación sísmica de la provincia de Girona. Como se puede observar en la Figura 58 casi el 50% de los edificios de los centros escolares

están localizados en suelo tipo B´ y un 12% se encuentran en el suelo tipo E que es el tipo de suelo con mayor amplificación. Los edificios restantes se encuentran en suelos tipo B (17%) o tipo A (23%).

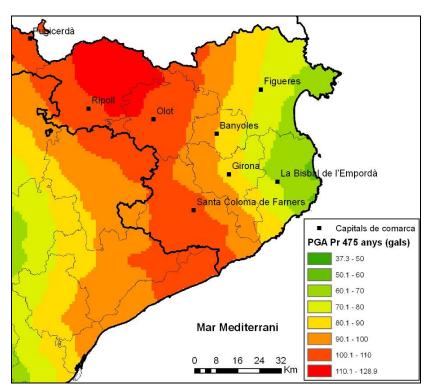


Figura 56. Aceleraciones máximas para un período de retorno de 475 años (Geoter, 2008).

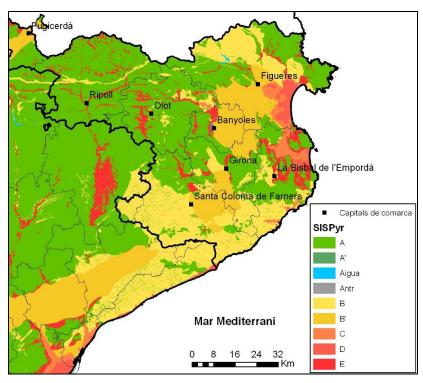


Figura 57. Mesozonación sísmica para la provincia de Girona.

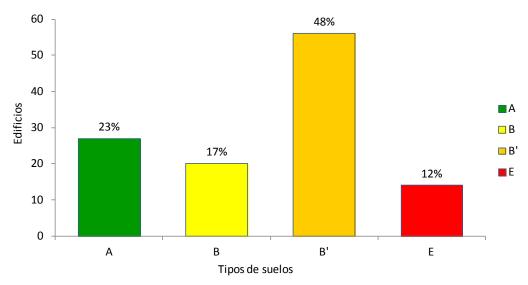


Figura 58. Distribución de los edificios de los centros escolares seleccionados de la provincia de Girona según la clase de suelo donde están situados.

La Figura 59 muestra el porcentaje de edificios en función del rango de PGA con efectos de suelo y del tipo de suelo en el que se encuentran para los periodos de retorno de 475 y 975 años. De esta figura se observa que casi un 90% de los edificios de especial importancia están expuestos a aceleraciones entre 0.16g y 0.22g para un periodo de retorno de 475 años, y entre 0.18g y 0.24g para un periodo de retorno de 975 años. Estos edificios corresponden a los situados en suelos tipo E i C, mientras que el 10% restante está expuesto a aceleraciones inferiores a 0.14g al estar ubicados en roca firme (suelo tipo A).

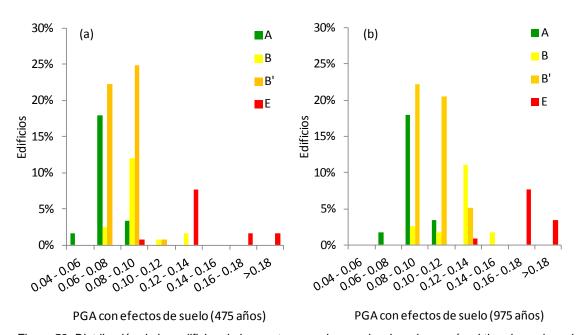


Figura 59. Distribución de los edificios de los centros escolares seleccionados según el tipo de suelo y el rango de PGA con efectos de suelo para los periodos de retorno de 475 y 975 años.

6.4 Evaluación del grado de daño medio de los centros escolares

Una vez identificado el tipo de suelo para cada edificio de los centros escolares estudiados, se asigna el correspondiente espectro de demanda sísmica y mediante el método del espectro de capacidad se determina el punto de comportamiento que permite evaluar el grado de daño medio esperado según las curvas de fragilidad disponibles para las tipologías del método.

La Figura 60 muestra la distribución de los edificios de los centros escolares seleccionados según el grado de daño medio obtenido. La mayoría de los edificios de los centros escolares podrían sufrir daños entre nulos y leves para los periodos de retorno considerados al estar asociados a un grado de daño entre 0 y 1. Para un periodo de retorno de 975 años, un 29% de los edificios estudiados pueden sufrir daños entre moderado y extensivo (grado de daño medio >2). Se espera que ninguno de los edificios presente un grado de daño medio asociado a daño entre extensivo y completo.

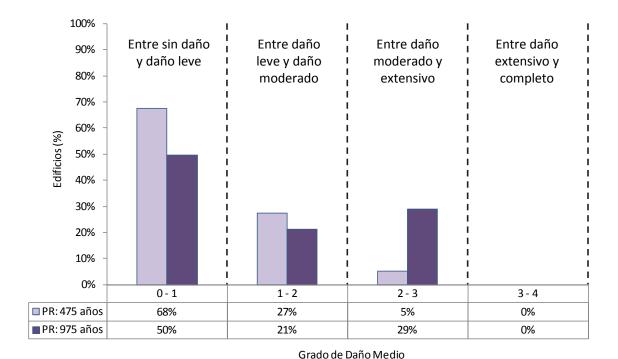


Figura 60. Distribución de los edificios de los centros escolares seleccionados de la provincia de Girona según el daño esperado para los periodos de retorno de 475 y 975 años.

La Figura 61 presenta la dispersión del grado de daño medio de los centros escolares en un mismo municipio para un periodo de retorno de 475 años mientras que la Figura 62 muestra este mismo análisis para un periodo de retorno de 975 años. Como se puede observar las escuelas de Alp y Ribes de Fresser muestran el mayor grado de daño medio para ambos periodos de retorno y la dispersión es casi nula debido a que solo se ha estudiado una escuela para cada uno de estos municipios. Las escuelas de estos dos municipios muestran valores del promedio del grado de daño mayores de 2.0 por lo que no cumplen con el criterio de Operatividad para el periodo de retorno de 475 años, pero si cumplen con el criterio de seguridad de la Vida a ser inferiores de 2.8 para el periodo de retorno de 975 años.

Los municipios restantes muestran unos valores promedio del grado de daño medio inferiores pero también una dispersión mayor debido a su mayor número de escuelas y de edificios por escuela. Muchos de los valores máximos son cercanos al grado de daño 2 implicando que son probables daños de carácter moderado en algunas escuelas, mientras que los valores mínimos en muchos casos corresponde al grado de daño 0 indicando la posibilidad de que la escuela no sufra daño alguno. Algunas de las escuelas de Ripoll y Santa Coloma de Farners también incumplen el criterio de Operatividad con un grado de daño medio superior de 2.0 para un periodo de retorno de 475 años.

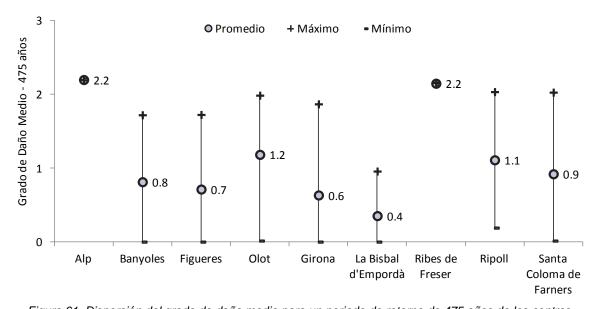


Figura 61. Dispersión del grado de daño medio para un periodo de retorno de 475 años de los centros escolares por municipio.

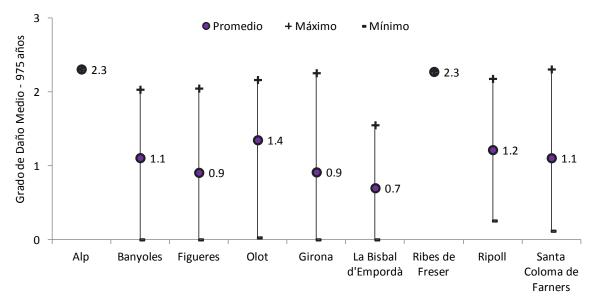


Figura 62. Dispersión del grado de daño medio para un periodo de retorno de 975 años de los centros escolares por municipio.

En la Figura 63 se presentan el grado de daño medio y el PGA con efectos de suelo de los edificios analizados para un periodo de retorno de 975 años. De esta Figura se observa que los edificios con tipologías de mampostería no reforzada (M3.1, M3.3 y M3.4) así como las estructuras irregulares de hormigón armado (RC3.2) tienen mayores niveles de daño que los edificios de estructuras metálicas (S1, S3 y S4) y que los edificios regulares de hormigón armado con muros de relleno de mampostería (RC3.1).

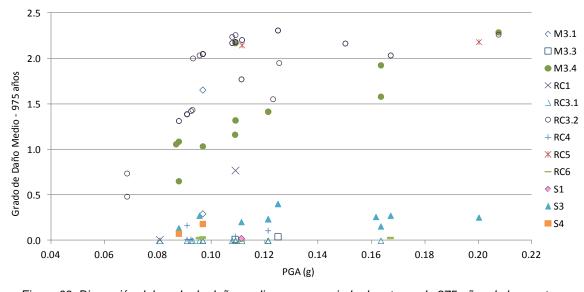


Figura 63. Dispersión del grado de daño medio para un periodo de retorno de 975 años de los centros escolares por municipio.

6.5 Evaluación de la seguridad sísmica

Los valores del grado de daño medio para un periodo de retorno de 475 años obtenidos para cada uno de los edificios de los centros escolares estudiados se muestran en dos figuras debido al gran número de edificios estudiados (Figura 64 y Figura 65). Estos se han agrupado por municipios para facilitar su identificación. En estas figuras se muestra una línea discontinua que marca el límite correspondiente al grado de daño 2 indicando el límite máximo del grado de daño medio para el cual, según el criterio *Operacional*, estos edificios aún serian capaces de prestar sus principales servicios y se consideran seguros para sus ocupantes.

Al aplicar el criterio Operacional se puede observar que 6 edificios de 4 escuelas localizadas en los municipios de Alp, Ribes de Fresser, Ripoll y Santa Coloma de Farners no cumplen con este criterio por lo que podrían sufrir interrupciones de los servicios esenciales que ofrecen o puede no ser una estructura segura para ser ocupada. Seria necesario evaluar más detalladamente la vulnerabilidad de estas estructuras para tomar medidas de mitigación de daños que puedan reducir el daño de grado medio asociado a un periodo de retorno de 475 años.

De esta manera, la gran mayoría de los edificios escolares estudiados cumplen con el criterio *Operacional* ya que un 95% de los edificios (111 de 17) presentan un grado de daño medio inferior a 2. Por lo tanto estos edificios podrían continuar funcionando sufriendo únicamente la interrupción de algunos de los servicios no esenciales. De esta manera un 92% (49 de 53) de las escuelas estudiadas sí podrían continuar ofreciendo sus servicios con algunas interrupciones.

La Figura 66 y la Figura 67 muestran los valores del grado de daño medio para un periodo de retorno de 975 años obtenidos para los edificios de los centros escolares estudiados. En éstas, la línea discontinua marca el límite correspondiente al grado de daño 2.8 indicando el límite máximo del grado de daño medio según el criterio Seguridad de la Vida. Como se puede observar, todos los edificios de los centros escolares considerados cumplen con el criterio de Seguridad de la Vida por lo que podrían garantizar la seguridad de la vida de sus ocupantes para una peligrosidad asociada a un periodo de retorno de 975 años.

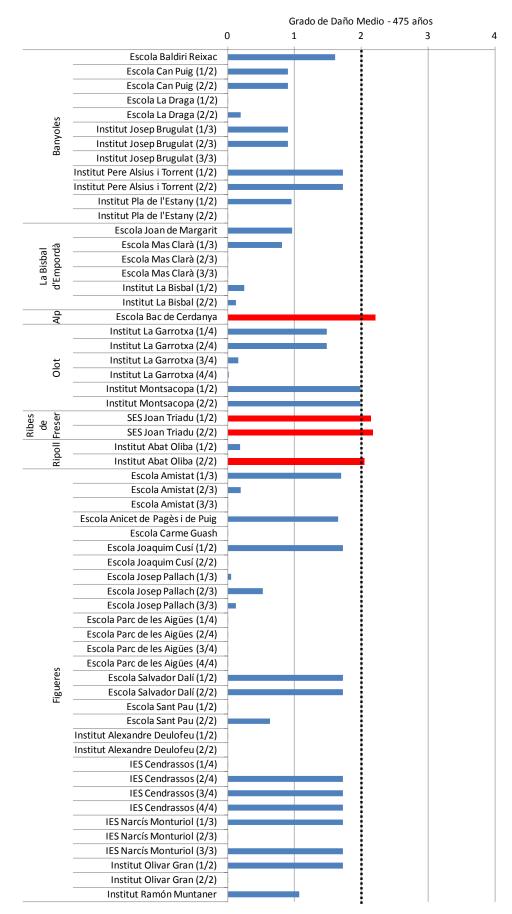


Figura 64. Aplicación del criterio de Operatividad para un periodo de retorno de 475 años (1/2).

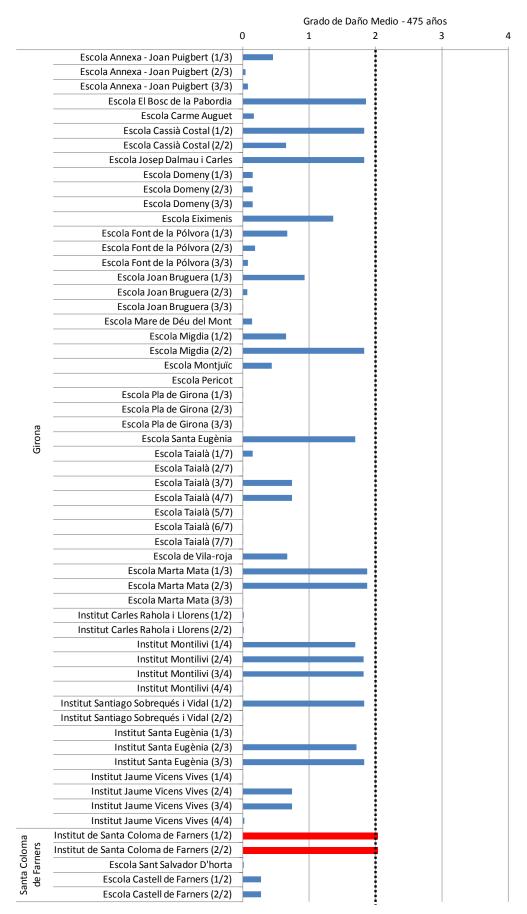


Figura 65. Aplicación del criterio de Operatividad para un periodo de retorno de 475 años (2/2).

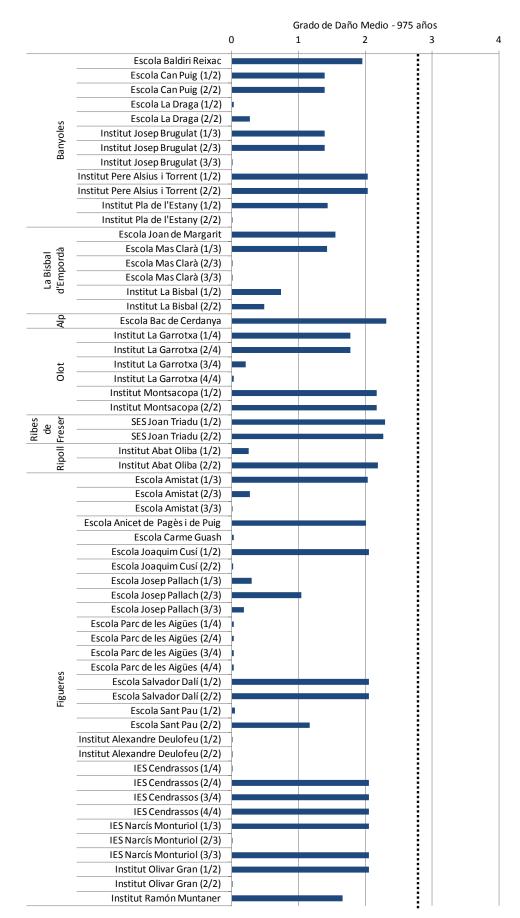


Figura 66. Aplicación del criterio de Seguridad de la Vida para un periodo de retorno de 975 años (1/2).

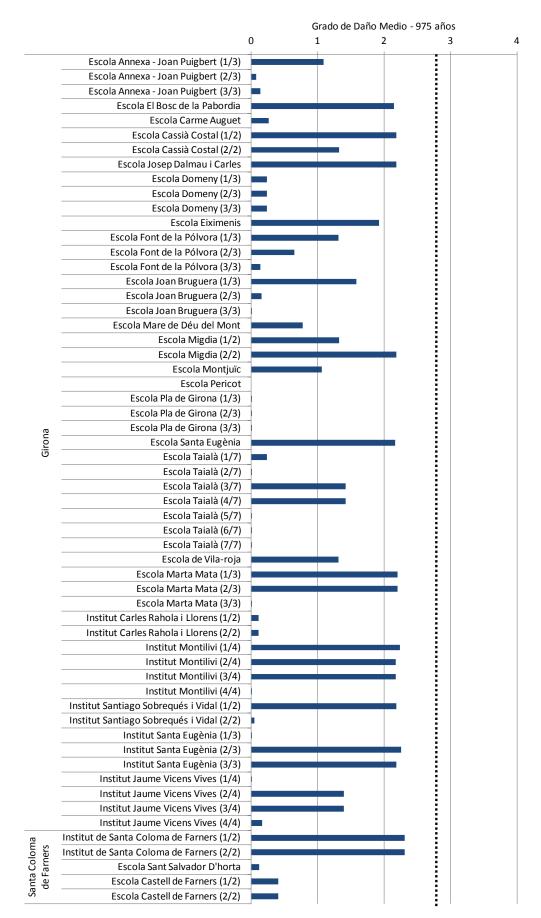


Figura 67. Aplicación del criterio de Seguridad de la Vida para un periodo de retorno de 975 años (2/2).

6.6 Evaluación del índice de pérdida económica

Las pérdidas económicas directas se estiman para cada edificio siguiendo las metodologías presentadas en la sección 2.7 a partir de la matriz de probabilidad de daño y de los valores de la pérdida en porcentaje asociados a cada estado de daño. La Figura 69 y la Figura 70 presentan el índice de pérdida económica estimado para cada uno de los 117 edificios escolares estudiados y para los periodos de retorno considerado. El mayor índice de pérdida económica para el periodo de retorno de 475 años corresponde a un 34% del valor de reposición del edificio, mientras que para el periodo de retorno de 975 años es de un 38%.

La Figura 68 muestra la distribución del índice de pérdida económica obtenido para los edificios de los centros escolares estudiados. Más del 40% de los edificios estudiados presentan un índice de pérdida económica inferior al 10% para los dos periodos de retorno considerados. Para el periodo de retorno de 475 años solo un 4% de los edificios presentan un índice de pérdida económica superior al 30%, mientras que para el periodo de retorno de 975 años un 40% de los mismos presentan un índice de pérdida económica superior al 30%.

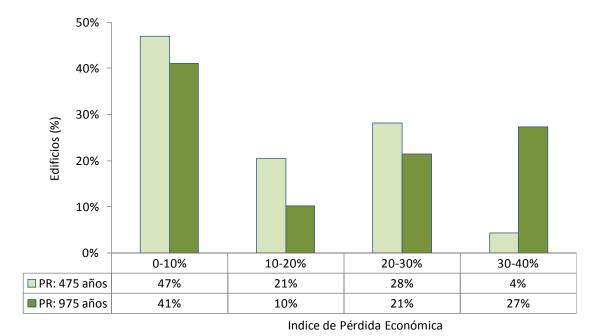


Figura 68. Distribución del índice de pérdida económica de los centros escolares estudiados.

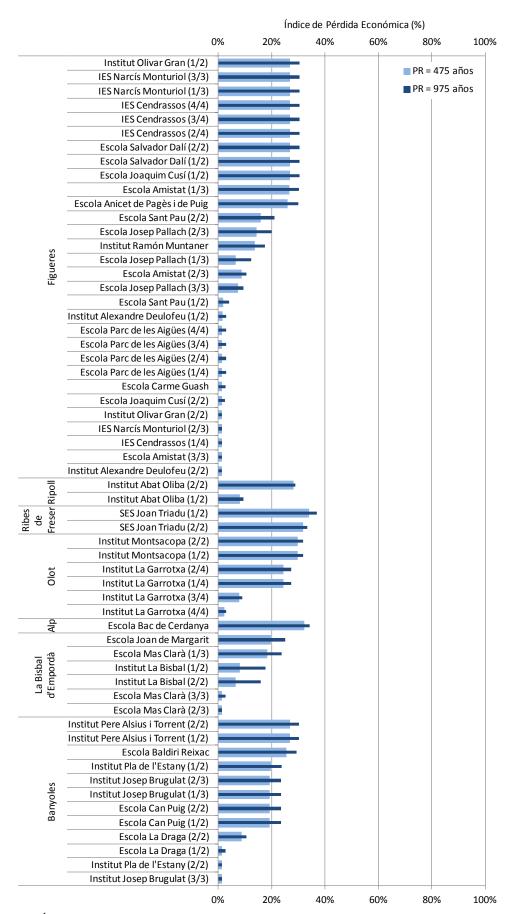


Figura 69. Índice de pérdida económica estimado para los periodos de retorno considerados (1/2).

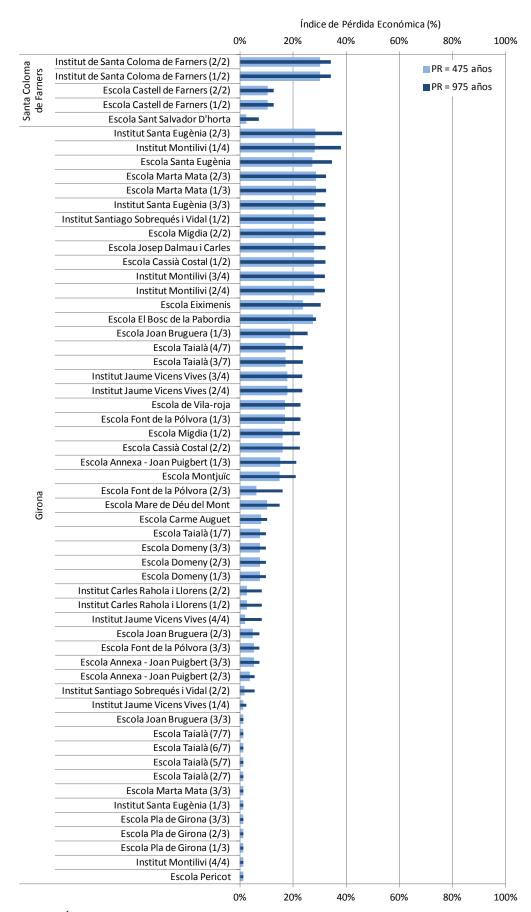


Figura 70. Índice de pérdida económica estimado para los periodos de retorno considerados (2/2).

La Figura 71 muestra la dispersión del índice de pérdida económica para un periodo de retorno de 475 años para cada uno de los municipios con escuelas estudiadas. Los valores más altos del promedio de los índices de pérdida económica a nivel municipal se obtienen para los municipios de Alp y Ribes de Fresser con un 32% y un 33%, respectivamente. Estos dos municipios, representados en el estudio por una única escuela, son los que se ven afectados por la mayor peligrosidad sísmica de la provincia de Girona y sus escuelas estudiadas no cumplen con el criterio de Operatividad para un periodo de retorno de 475 años. Los municipios restantes presentan una mayor dispersión de valores al poseer un mayor número de edificios escolares sus promedios del índice de pérdida económica varían entre el 9 y el 20%.

La dispersión del índice de pérdida económica para un periodo de retorno de 975 años por municipios con escuelas estudiadas se presenta en la Figura 72. Como puede observarse los valores promedios, máximos y mínimos aumentan en mayor o menor grado al considerarse el periodo de retorno de 975 años. Los centros escolares estudiados en los municipios de Alp y Ribes de Fresser siguen siendo aquellos con los valores más altos del índice de pérdida económica. Sorprende el aumento de la dispersión del índice de pérdida económica de los centros escolares del municipio de Girona debido al aumento del valor máximo obtenido entre sus centros escolares que sobrepasa del 35%.

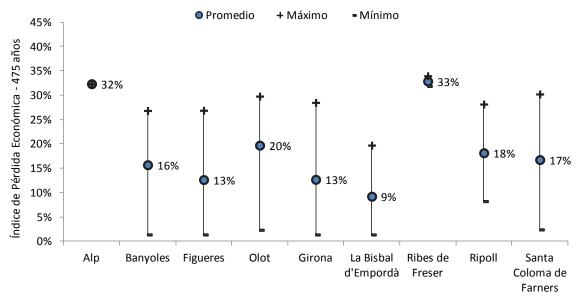


Figura 71. Dispersión municipal del índice de pérdida económica para un periodo de retorno de 475 años.

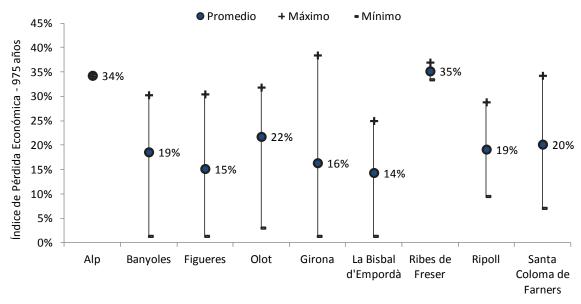


Figura 72. Dispersión municipal del índice de pérdida económica para un periodo de retorno de 975 años.

6.7 Evaluación del índice de funcionalidad

En forma similar, el índice de funcionalidad se evaluó para cada edificio escolar estudiado, considerando los resultados del grado de daño medio y los criterios de comportamiento sugeridos en el documento FEMA 396 (2003), tal como se describe en la sección 2.8. En la Figura 73 y la Figura 74 se presenta el índice de funcionalidad estimado para cada uno de los edificios de los centro escolares seleccionados.

La Figura 75 muestra la distribución de los resultados del índice de funcionalidad obtenido para los edificios de los centros escolares estudiados. La mayoría de los edificios de los centros escolares, un 61% para un periodo de retorno de 475 años y un 50% para el periodo de retorno de 975 años, presentan un índice de funcionalidad superior al 0.90 considerando estos escenarios. Aún cuando el grado de daño promedio obtenido es moderado, la funcionalidad de algunos edificios podría reducirse considerablemente. Un 30% de los edificios de centro escolares analizados presentan índices de funcionalidad inferiores 0.50 para un periodo de retorno de 475 años. Para un periodo de retorno de 975 años el índice de funcionalidad aumenta ligeramente llegando al 34%.

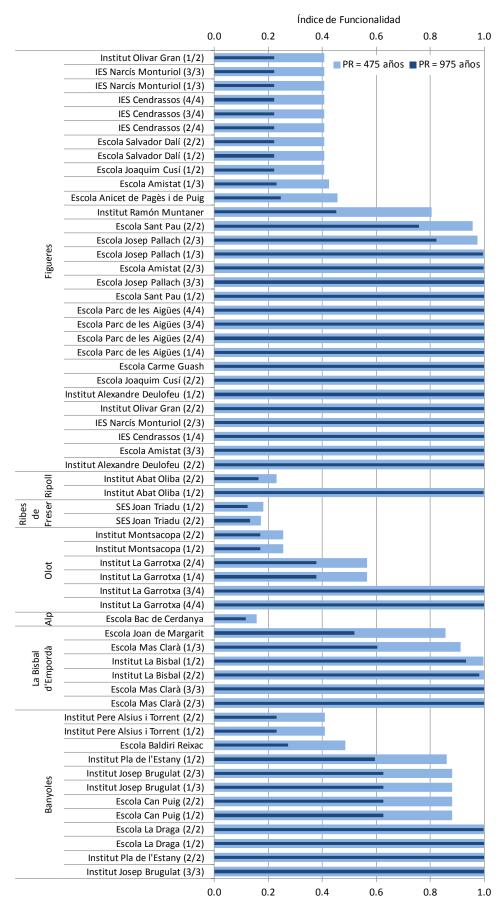


Figura 73. Índice de funcionalidad estimado para los periodos de retorno considerados (1/2).

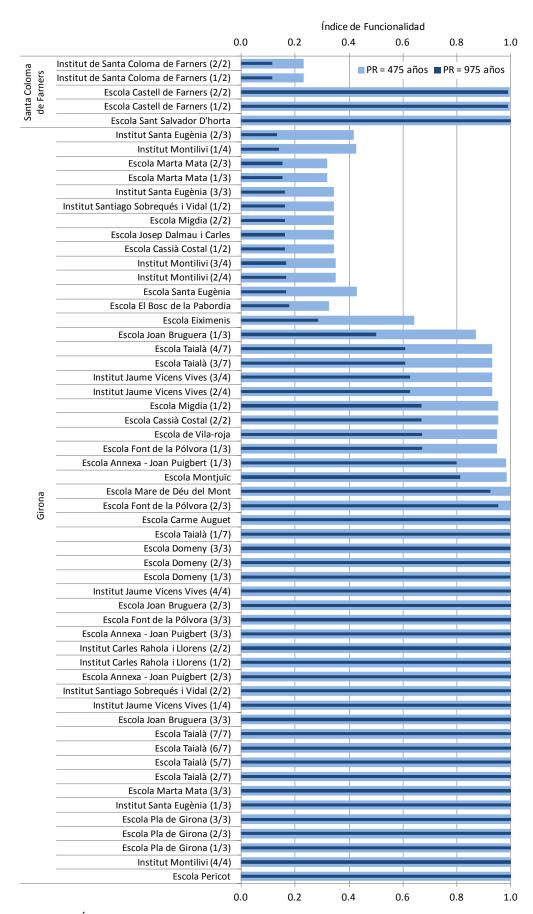


Figura 74. Índice de funcionalidad estimado para los periodos de retorno considerados (2/2).

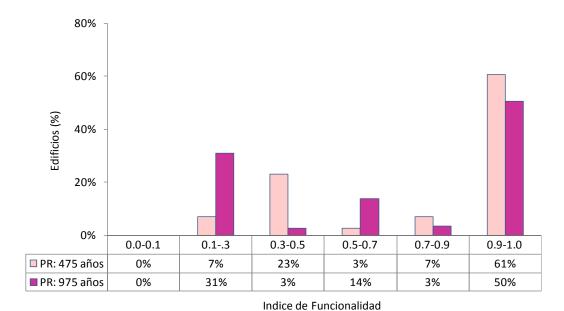


Figura 75. Distribución del índice de funcionalidad de los centros escolares estudiados.

Para el índice de funcionalidad también se han obtenido la dispersión de los valores obtenidos para los centros escolares estudiados en un mismo municipio como se muestra en la Figura 76 para un periodo de retorno de 475 años y en la Figura 77 para un periodo de retorno de 975 años. Para un periodo de retorno de 475 años los valores promedios más bajos del índice de funcionalidad se obtienen para los centros escolares analizados en los municipios de Alp y Ribes de Fresser con un 0.16 y un 0.18, respectivamente, por lo que sus funciones se verían seriamente afectadas. Los municipios restantes presentan una mayor dispersión y sus promedios del índice de funcionalidad varían entre el 0.61 y el 0.96. Estos presentan máximos de 1.0 por lo que muchos edificios escolares estudiados podrían mantener el 100% de su funcionalidad, y mínimos cercanos al 20% por lo que su funcionalidad se afectaría de manera importante.

Considerando el periodo de retorno de 975 años, los centros escolares de los municipios de Alp y Ribes de Fresser presentan una funcionalidad inferior. Para los municipios restantes se observa que hay centros escolares que aún para este periodo de retorno continúan conservando toda su funcionalidad (valor máximo de 1.0) pero los valores mínimos que representan los edificios más afectados han disminuido en relación a los observados para el periodo de retorno de 475 años llegando incluso a ser inferiores del 0.2. Los valores del promedio municipal del índice de funcionalidad para los centros escolares estudiados varían entre 0.12 y 0.84.

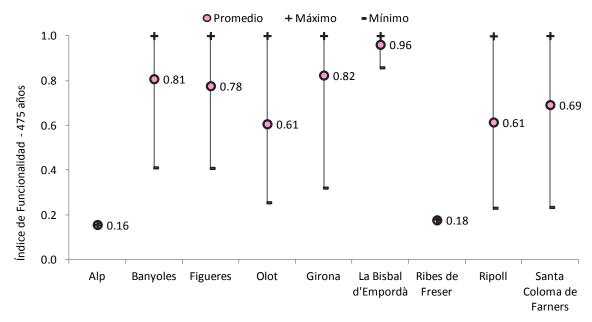


Figura 76. Dispersión municipal del índice de funcionalidad para un periodo de retorno de 475 años.

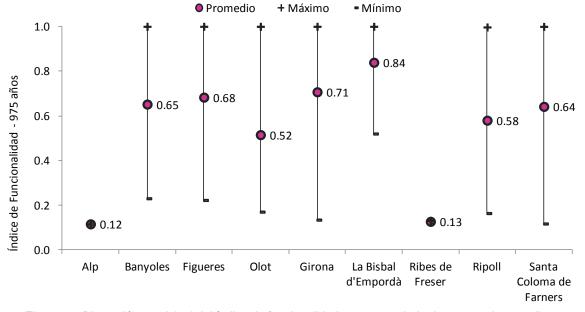


Figura 77. Dispersión municipal del índice de funcionalidad para un periodo de retorno de 975 años.

6.8 Evaluación del tiempo de recuperación

El tiempo esperado de recuperación se estimó siguiendo los planteamientos del FEMA 227 (FEMA 1992), como se describe en la sección 2.8. En la Figura 79 y la Figura 80 se presenta el tiempo de recuperación estimado para cada uno de los edificios de los centros escolares estudiados.

La Figura 78 presenta la distribución de los edificios escolares según el tiempo de recuperación estimado según la metodología propuesta por Valcárcel (2013). Se observa que para un periodo de retorno de 475 años, un 50% de los edificios presentan un tiempo de recuperación inferior a 30 días, un 32% obtienen un tiempo de recuperación entre 90 y 120 días y los restantes podrían tardar entre 30 y 60 días en restablecer la totalidad de sus servicios. Para un periodo de retorno de 475 años, un 44% de los edificios tendrían un tiempo de recuperación inferior a 30 días y un 7% tardarían entren 30 y 90 días en recuperarse. Además para este periodo de retorno disminuye drásticamente el porcentaje de edificios que tardarían entre 90 y 120 días en recuperare hasta alcanzar el 13%. Debido al aumento del gradeo de daño medio para el periodo de retorno de 975 años un porcentaje importante de los edificios, un 35%, podrían tardar entre 120 y 240 días en recuperarse de los efectos de un evento sísmico de tal magnitud.

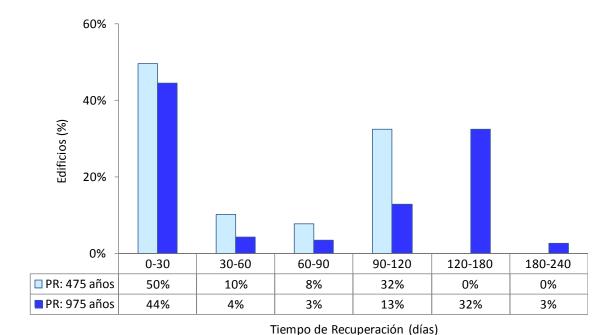


Figura 78. Distribución del tiempo de recuperación de los centros escolares estudiados.

La Figura 81 y la Figura 82 muestran la dispersión a nivel municipal del tiempo de recuperación esperado para los centros escolares considerando los periodos de retorno de 475 y 975 años, respectivamente. Nuevamente destacan los centros escolares estudiados de los municipios de Alp y Ribes de Fresser por sus altos valores del tiempo de recuperación en torno a los 170 días para un periodo de retorno de 475 años y de 180 días (6 meses) para un periodo de retorno de 975 años.

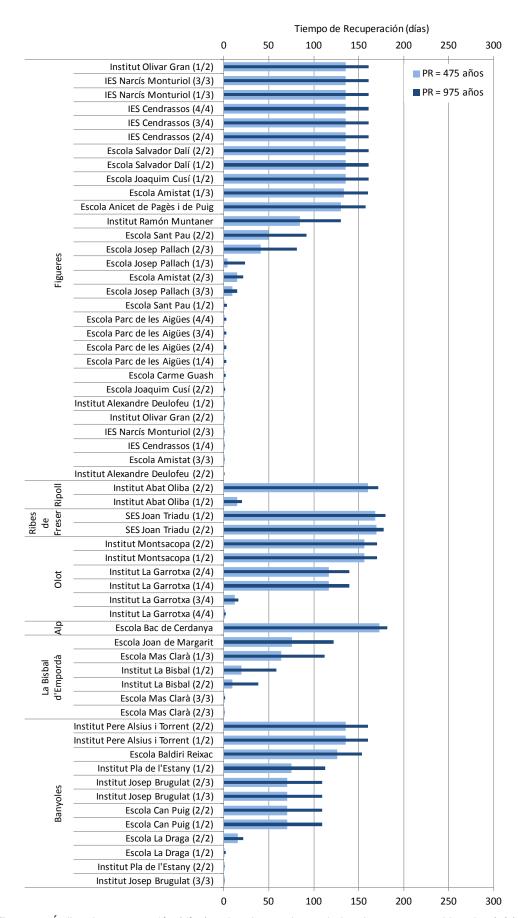


Figura 79. Índice de recuperación (días) estimado para los periodos de retorno considerados (1/2).

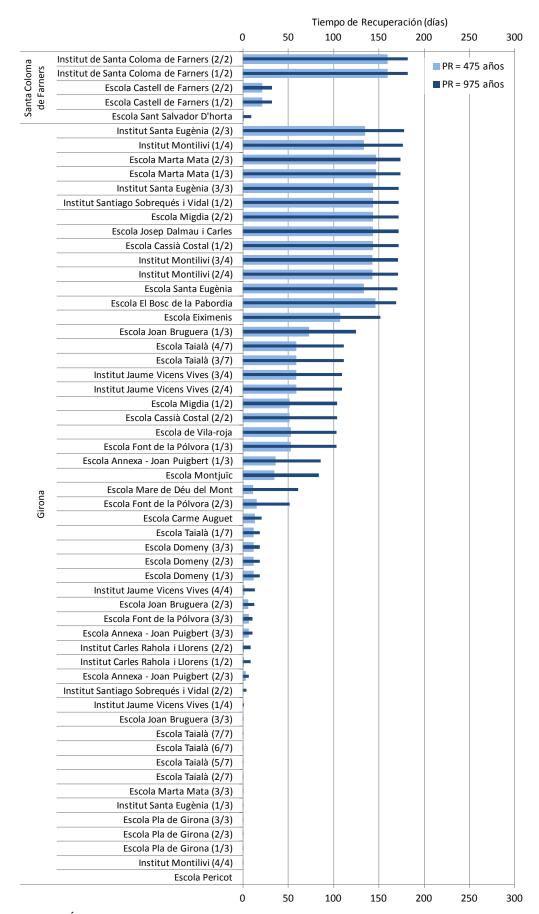


Figura 80. Índice de recuperación (días) estimado para los periodos de retorno considerados (2/2).

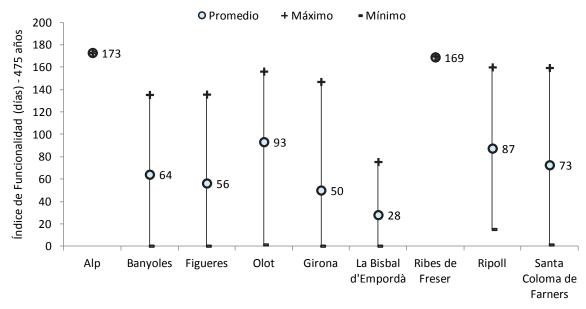


Figura 81. Dispersión municipal del tiempo de recuperación para un periodo de retorno de 475 años.

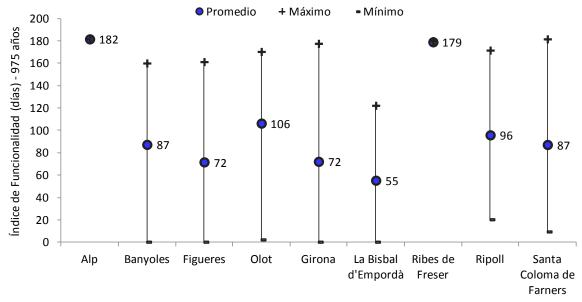


Figura 82. Dispersión municipal del tiempo de recuperación para un periodo de retorno de 975 años.

Se puede observar una gran variación en los tiempos de recuperación de los centros escolares de los restantes municipios. Para éstos, el tiempo de recuperación mínimo es inferior a los 20 días. Para el periodo de retorno de los 475 años, el tiempo de recuperación promedio de los municipios restantes varía entre 28 y 93, mientras que este promedio del tiempo de recuperación aumenta en el caso del periodo de retorno de 975 años variando entre 55 y 106 días. La mayoría de los valores máximos a nivel

municipal son superiores a los 130 días para el periodo de retorno de 475 años y de 160 para el periodo de retorno de 975 años.

6.9 Resumen y discusión

En este Capítulo se ha presentado un análisis simplificado de la seguridad de un conjunto de centros educativos en Cataluña. En este contexto, se han seleccionado un conjunto de edificios sobre los cuales se han identificado las principales propiedades estructurales con el fin de realizar una evaluación de su seguridad sísmica. Dicho conjunto está compuesto por instalaciones educativas de las capitales de comarca de la Provincia de Girona que fueron seleccionados junto a personal del Departament d'Ensenyament de Cataluña

Con el apoyo del Departament d'Ensenyament, Valcárcel (2013) dispuso de planos estructurales, arquitectónicos, memorias de construcción y de obras de ampliación y reforma, entre otros documentos, para cada uno de los 117 edificios que forman los 54 centros escolares seleccionados. A partir de estos datos, los centros de enseñanza se clasificaron en tipologías estructurales empleando los formularios de evaluación de la vulnerabilidad de centros educativos, elaborados por la Universidad Politécnica de Cataluña en conjunto con el Instituto Geológico de Cataluña. Una vez clasificados los edificios, se les asignaron los espectros de capacidad y curvas de fragilidad correspondientes de acuerdo a las matrices de tipologías de los proyectos RISK UE, para edificios de mampostería y hormigón armado y HAZUS para edificios metálicos.

El análisis de seguridad se ha desarrollado para escenarios definidos por sismos con periodos de retorno de 475 y 975 años. El comportamiento sísmico de los edificios se estimó empleando el método simplificado basado en espectros de capacidad. La seguridad de las instalaciones se analiza en base a los niveles de comportamiento sugeridos por el Comité VISION 2000. Además se estiman para cada escenario indicadores de las posibles perdidas económicas, la funcionalidad y el tiempo de recuperación de los edificios.

Del total de centros analizados, para un periodo de retorno de 975 años, todos los centros educativos cumplen con el requisito de seguridad de la vida. Por otro lado, para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 68% de los edificios tienen un grado de daño menor que 1 (daños entre nulos y leves); el 27% tienen daños que varían

entre 1.6 y 2 (daños entre leves y moderados). Solo un 5% tienen daños mayores al estado moderado. Al considerar los niveles de seguridad sugeridos por el comité VISION 2000, se observa que este 5% de los edificios no cumplen con el nivel de comportamiento operacional. Los edificios restantes tienen daños esperados inferiores al estado de daño moderado y, por lo tanto, cumplen tal requisito.

Al revisar los resultados del grado de daño medio esperado según tipologías estructurales, se observa que los centros construidos con estructuras regulares de pilares y forjados de hormigón armado y las estructuras metálicas, tienen un mejor comportamiento que los edificios de mampostería no reforzada y que los edificios de pilares y forjados de hormigón armado irregulares.

Como complemento al análisis de seguridad, se han estimado también los porcentajes de pérdida económica respecto al valor de reposición de las instalaciones, considerando eventos de periodo de retorno de 475 años y 975 años. Más del 40% de los edificios estudiados presentan un índice de pérdida económica inferior al 10% para los dos periodos de retorno considerados. Para el periodo de retorno de 475 años solo un 4% de los edificios presentan un índice de pérdida económica superior al 30%, mientras que para el periodo de retorno de 975 años un 40% de los mismos superan este porcentaje de pérdida económica.

Para los edificios de los centros escolares estudiados también se evaluaron el índice de funcionalidad y el tiempo de recuperación. Para un periodo de retorno de 475 años un 61% de los edificios presenta un índice de funcionalidad mayor o igual a 0.9 mientras que el 30% presentan un índice de funcionalidad inferior a 0.50 por lo que su funcionalidad se puede ver muy afectada. Considerando un periodo de retorno de 975 años, estos porcentajes corresponden a un 50% y un 34% de los edificios respectivamente.

Los resultados del tiempo de recuperación indican que un 50% y un 44% de los edificios escolares estudiados podrían recuperarse en menos de 3º días considerando los periodos de retorno de 475 y 975 años, respectivamente. Mientras tanto para el periodo de retorno de 475 años un 32% de los edificios tardarían entre 3 y 4 meses en recuperarse. Al considerar el periodo de retorno de 975 años un 48% de los edificios tendrían un tiempo de recuperación de entre 3 y 8 meses.

En el marco del Plan Especial de Emergencias SÍSMIcas de CATaluña (SISMICAT), los resultados de este estudio deben ser considerados como una evaluación preliminar, útil para asignar prioridades para el estudio detallado de la vulnerabilidad de los edificios, así como para la reducción de su vulnerabilidad. Dado el alcance de este estudio, se recomienda el desarrollo de análisis estructurales detallados y específicos para dichas tipologías, con el fin de identificar apropiadamente la vulnerabilidad de los centros educativos, considerando las técnicas de construcción locales, lo cual mejoraría la confiabilidad del análisis.

A pesar del alcance del análisis, se debe recalcar que las pérdidas potenciales de los edificios pueden representar costos de oportunidad considerables para el sector educativo. En este sentido, se considera necesario discutir los estándares de seguridad establecidos para estas instalaciones en la Norma de Construcción Sismorresistente Española. Asimismo, se sugiere incluir en la planificación de la construcción de la infraestructura educativa y en las guías de construcción de nuevos centros educativos, la seguridad de los alumnos, así como los valores esperados de las pérdidas frente al peligro sísmico.

7 Conclusiones

7.1 Introducción

Durante este trabajo se ha pretendido realizar la estimación de daños en edificios de especial importancia considerando una metodología de carácter intermedio, en la cual, la demanda sísmica se representa para periodos de retorno específicos, y se define mediante los espectros de respuesta elástica correspondientes a su ubicación.

Con el fin de simplificar el cálculo de la demanda sísmica para periodos de retorno de 475 y 975 años, se han ajustado y comparado los espectros sugeridos en el EC-8 Tipo I y Tipo II, así como los de la NCSE-02 con los espectros obtenidos en un PSHA realizado en Cataluña, España.

En este estudio se consideran dos escenarios que se basan en mapas de peligrosidad sísmica probabilista El primero correspondiendo con un periodo de retorno de 475 años y el segundo con un periodo de retorno de 975 años. Los espectros de respuesta elástica 5% amortiguada, son compatibles con las formas espectrales definidas en el Eurocódigo EC8 (tipo II) para terremotos de magnitud moderada. Los PGA considerados se han ajustado a partir de un estudio específico de la peligrosidad sísmica de Cataluña (PSHA por su sigla en inglés).

Estos resultados corresponden a espectros estimados en roca firme. Para considerar los efectos de suelo, se han adoptado los resultados de un estudio de mesozonación sísmica de Cataluña. En dicho estudio se ha desarrollado un mapa de clasificación de suelos y se han caracterizado los espectros de respuesta elástica, adoptando también, con ligeras modificaciones, los tipos de suelos y los parámetros sugeridos en el EC8 para espectros tipo II.

En cuanto a la vulnerabilidad de los edificios, se ha procedido de forma simplificada. Así, los edificios se clasifican en tipologías estructurales de acuerdo a la matriz tipológica del proyecto RISK-UE. Para la clasificación, se han diseñado y usado un conjunto de formularios en los que se recolecta información general de las instalaciones, así como las propiedades estructurales más relevantes. Una vez

clasificados los edificios, estos se caracterizan por los espectros de capacidad y curvas de fragilidad correspondientes a cada tipología.

Para evaluar el comportamiento de los edificios ante los escenarios sísmicos considerados, se ha seguido también una metodología simplificada basada en espectros de capacidad. En este método se compara el espectro de capacidad de cada tipología con el espectro de demanda correspondiente a la ubicación del edificio. Como resultado se obtiene el desplazamiento espectral máximo de la estructura ante la acción sísmica considerada.

Para evaluar el daño, se han empleado las curvas de fragilidad de cada tipología, las cuales, para cada estado de daño, definen la probabilidad de que éste sea excedido, como una función del desplazamiento espectral de la estructura. Una vez evaluadas las curvas de fragilidad, es posible encontrar la matriz de probabilidad de daño y el grado de daño medio.

Finalmente, la evaluación de la seguridad de los edificios de especial importancia seleccionados en las dos zonas de estudio se basado en la comparación del daño estimado con los requisitos de seguridad planteados por el comité VISION 2000. Así mismo, se han aplicado las funciones desarrolladas por Valcárcel (2013) para evaluar la pérdida económica, así como la funcionalidad dado el daño esperado, con el fin de valorar si la seguridad exigida es suficiente o no.

7.2 Seguridad Sísmica

La evaluación de la seguridad sísmica de los edificios esenciales se asocia a la verificación de estándares de comportamiento específicos para diferentes niveles de peligrosidad. Este enfoque es práctico ya que cuenta con procedimientos de evaluación y estándares consensuados por expertos. De esta manera, diferentes agentes pueden realizar una misma evaluación o adelantar procedimientos de revisión, con fines de control y aseguramiento de la calidad. No obstante, presenta limitaciones en cuanto al desconocimiento de la confiabilidad del análisis, a la subjetividad de la definición de los requisitos de seguridad, así como a la falta de comunicación de los beneficios que se obtienen al exigir mayores niveles de seguridad.

Frente a estas limitaciones de la evaluación de la seguridad, la evaluación del riesgo presenta ventajas, ya que permite identificar pérdidas para todos los eventos posibles a los cuales se encuentran eventualmente expuestos los edificios. No obstante, debe señalarse que estos resultados no son medidas objetivas del riesgo y por lo tanto no pueden compararse con tasas de fallas observadas. Dada la incertidumbre en las estimaciones de riesgo, sus resultados sólo son válidos en el contexto del modelo empleado, siendo útiles para comparar las pérdidas estimadas entre diferentes alternativas estructurales.

Así, la gestión de la seguridad de los edificios esenciales no necesariamente tiene que limitarse a la estimación de riesgos, o a la verificación de estándares de comportamiento. Estos dos enfoques no son excluyentes, sino complementarios. A través de los análisis probabilistas de pérdidas se pueden establecer medidas aproximadas del nivel de pérdidas aceptables, así como de la factibilidad de las actividades de reducción de riesgos. En este sentido, se resalta que no hace falta tener bases objetivas sobre las pérdidas esperadas para tomar decisiones en cuanto a la seguridad de los edificios esenciales. Para enfrentar el problema son necesarios modelos de pérdidas para describir los escenarios posibles, y sobre estos resultados, tomar una decisión. La confiabilidad de las acciones sólo podrá evaluarse a través de simulaciones, o a partir de experiencias post-desastre.

Por otro lado, el cumplimiento de estándares de comportamiento comprende la selección de criterios de seguridad claros, que son útiles para la definición de normas de cumplimiento. A su vez, los factores de importancia empleados para aumentar la confiabilidad de los edificios esenciales son una solución práctica ante riesgos que son difíciles de cuantificar.

7.3 Metodología para la evaluación de la seguridad sísmica y de los daños esperados en edificios de especial importancia

En este trabajo se adoptó un método basado en espectros de capacidad tal como fue propuesto en el proyecto RISK UE (Mouroux et al., 2004) para evaluar el comportamiento de los edificios. En este procedimiento se comparan los espectros de capacidad de tipologías estructurales con los espectros de demanda correspondientes a la ubicación de los edificios. Su seguridad se calificó de acuerdo a los estándares propuestos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995).

7.3.1 Los edificios

Se han elaborado formularios y guías para la evaluación de la vulnerabilidad estructural de los edificios. Estas herramientas fueron utilizadas en inspecciones visuales rápidas. Estos formularios fueron útiles para clasificar los edificios en tipologías estructurales, así como para recopilar información en cuanto a la ubicación, área y valor de la instalación y tipo de servicios que prestan. Para evaluar el comportamiento y el daño esperado en los edificios, a cada tipología estructural se asignó un espectro de capacidad y curvas de fragilidad para los estados de daño, leve, moderado, extensivo y completo.

7.3.2 La acción sísmica

La decisión sobre la cuantificación de las acciones sísmicas probables se basa en un estudio nuevo y específico para Cataluña, realizado por encargo del Instituto Geológico de Cataluña (GEOTER 2008). En este sentido, se consideró oportuno usar las formas espectrales previstas en el Eurocódigo EC 8 ajustadas a los resultados del estudio de GEOTER (2008). Así, se compararon los espectros de amenaza uniforme obtenidos para Cataluña con las formas espectrales del EC 8, concluyendo que las características de la sismicidad de Cataluña corresponden a las formas espectrales de tipo II, que efectivamente corresponden a terremotos moderados (de magnitud menor a 5.5). Una vez adoptadas estas formas espectrales analíticas, se observó que, para un periodo de retorno de 475 años, los espectros tipo II normalizados al PGA, eran mayores que los valores medios de los espectros de amenaza uniforme, correspondiendo aproximadamente al percentil 70. A su vez, se observó que los espectros correspondientes al percentil 70 (para un periodo de retorno de 475 años) eran similares a los valores medios (percentil 50) de los espectros de amenaza uniforme de periodo de retorno de 975 años.

Bajo estas consideraciones, para definir la demanda sísmica (en roca firme), para un periodo de retorno de 475 años, se ajustaron (redujeron) los espectros del EC 8 Tipo II de forma que la meseta de aceleración constante fuera igual al valor máximo de los espectros obtenidos en el estudio de GEOTER (2008). Un procedimiento similar se empleó para definir la demanda sísmica para un periodo de retorno de 975 años.

Al respecto, se señala que la reducción de las formas espectrales del EC 8 para que la meseta de aceleración constante coincida con los valores máximos de los espectros obtenidos en el PSHA, puede observarse también como una reducción del PGA. Para este caso, los PGA reducidos del evento de periodo de retorno de 975 son semejantes al PGA calculado para eventos de periodo de retorno de 475 años. De esta manera, quedaron totalmente definidas las acciones sísmicas en todo el territorio de Cataluña en términos espectrales compatibles con las del EC 8 y para periodos de retorno de 475 y 975 años, lo que ha facilitado la aplicación sistemática y masiva de los análisis de comportamiento y daño esperados.

Para considerar los efectos de suelo se emplearon espectros de respuesta, de acuerdo a los resultados de estudios de mesozonación sísmica (IGC 2011). Ya que los factores de amplificación varían desde 1.2 (para suelo tipo B') hasta 1.8 (para suelo tipo E), se consideró importante incluir el tipo de suelo para evaluar la demanda sísmica en los edificios y así desarrollar un modelo más completo para el análisis del comportamiento y del daño de los edificios.

7.3.3 Daños, pérdidas económicas, funcionalidad y de tiempos de recuperación

Mediante este trabajo, Valcárcel (2013) ha definido y adoptado tres índices importantes: 1) índice de pérdida económica, 2) índice de funcionalidad y 3) índice de recuperación.

Para estimar la pérdida económica se ha propuesto un índice en el cual la pérdida se expresa como porcentaje del valor del edificio. Para calcular dicho índice se emplean las estimaciones de la matriz de probabilidad de daño. A su vez, se definen, para cada estado de daño (leve, moderado, extensivo y completo) conjuntos difusos para expresar la pérdida económica. Dichos conjuntos se describen por funciones de pertenencia, en las cuales, las abscisas corresponden a un determinado porcentaje de pérdida y las ordenadas a la posibilidad de encontrar dicho porcentaje de pérdida en el estado de daño correspondiente.

Para evaluar el índice de pérdida se siguen los siguientes pasos: 1) para cada estado de daño, se multiplican (normalizan) las ordenadas de las funciones de pertinencia por la probabilidad de daño correspondiente, de acuerdo a los resultados de la matriz de probabilidad de daños; 2) se calcula la envolvente de las funciones de pertenencia

normalizadas; 3) se calcula el centroide de dicha envolvente. Este centroide corresponde al índice de pérdida y resulta útil para traducir el daño esperado en pérdidas económicas, considerando que para cada estado de daño, la pérdida económica tiene un rango de valores posibles.

En cuanto a la evaluación de la funcionalidad de las instalaciones, se propone un índice de funcionalidad que relaciona el grado de daño medio con una calificación de la funcionalidad de la instalación, siendo 1, funcional, operativo y 0, sin funcionamiento. Los valores del índice de funcionalidad se establecieron a partir de los niveles de comportamiento y daños esperados descritos en los documentos FEMA 273 (1997), FEMA 356 (2000), FEMA 395 (2003) y FEMA 396 (2003). Éste índice resulta de interés para calificar y priorizar los edificios en cuanto a su capacidad operativa durante una emergencia.

Finalmente, para evaluar el tiempo esperado de recuperación, se adoptaron los valores típicos para edificios comerciales, edificios de oficinas y edificios para servicios profesionales, técnicos y de negocios, propuestos en el documento FEMA 227 (1992). Estos valores se ajustaron de acuerdo al grado de daño medio, obteniéndose así el índice de recuperación. Éste índice resulta de interés para calificar y establecer prioridades respecto a los costos esperados por la pérdida de funcionalidad.

7.4 Seguridad sísmica de edificios de importancia especial en la comarca de Val d'Aran

El estudio se ha basado en la inspección de 40 edificios (33 instalaciones) que albergan servicios especiales y esenciales. De los resultados de la inspección de los edificios, se encontró que el 55% son estructuras de mampostería; un 24% de edificios de hormigón armado y 17% de edificios metálicos. Los edificios restantes (3%) son estructuras de madera. Aproximadamente el 70% de los edificios tienen hasta tres niveles sobre rasante; por esta razón, la mayoría se clasifica en edificios bajos. Cerca del 42% de los edificios, en especial escuelas de educación primaria y ayuntamientos, fueron construidos antes de 1962 sin requerimientos sismorresistentes. Alrededor del 37% se construyeron entre 1962 y 2002. Un 11% se ha construido a partir del año 2002.

En cuanto a la peligrosidad sísmica, cerca del 13% de las instalaciones se encuentran en roca firme (suelo tipo A), las cuales están expuestas a un PGA que varía entre 0.10g y 0.12g para periodos de retorno de 475 años y entre 0.11 y 0.135 para periodos de retorno de 975 años. Un 32% de los edificios se ubican en suelo tipo C y un 55% en suelo tipo E. Tales instalaciones están expuestos a un PGA's que varían entre 0.16g y 0.22 g para periodos de retorno de 475 años. Estas aceleraciones son del orden de 0.18g y 0.24 g para periodos de retorno de 975 años.

De los resultados de la evaluación de la seguridad, se encontró que para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 37% de los edificios tienen daños entre nulos y moderados y se consideran operacionales. El porcentaje restante (63%) no cumple tal requisito. Para el periodo de retorno de 975 años, se encontró que cerca del 11% de los edificios tienen daños extensivos o mayores y por lo tanto no cumplen con el requisito de seguridad de la vida. Los restantes tienen daños menores y por lo tanto cumplen tal requisito. Las instalaciones de personal y equipos de ayuda, así como los edificios de gobierno y de patrimonio histórico, son los que tienen en conjunto mayores daños esperados.

Para un periodo de retorno de 475 años, el promedio de las instalaciones tienen un índice de pérdida económica del 30% de su coste de reposición. En cuanto a su funcionalidad, se observa que cerca del 80% tienen un índice de funcionalidad menor a 0.5. Por último, cerca del 60% de las instalaciones tienen un periodo de recuperación entre 0 y 150 días. Cerca del 53% tienen un periodo de recuperación entre 150 y 200 días. Alrededor del 13% tienen un periodo de recuperación mayor a 200 días, indicando un impacto no despreciable del sismo con un periodo de retorno de 475 años.

Los resultados de este análisis son útiles para identificar los sectores, así como los edificios que presentan mayores daños, y priorizarlos según sus pérdidas económicas, índice de funcionalidad y tiempo de recuperación, con el fin de adelantar preparativos para la atención de emergencia, así como considerar y priorizar evaluaciones detalladas de la vulnerabilidad y posibles intervenciones estructurales.

7.5 Seguridad sísmica de un conjunto de centros educativos de la província de Girona

En este caso de estudio se seleccionaron un conjunto de centros educativos de Cataluña, con el fin de identificar sus propiedades estructurales y realizar una evaluación de su seguridad sísmica. El conjunto de centros educativos está compuesto por una selección de escuelas de la provincia de Girona.

Los edificios de la provincia de Girona se clasificaron en tipologías estructurales a partir de la revisión de planos estructurales, memorias de cálculo, entre otros documentos. Cerca del 15% son edificios de mampostería no reforzada. Alrededor del 70% de los edificios son de estructura de hormigón armado y el 15% restante son edificios de estructuras metálicas. En general, los centros educativos son estructuras de hasta 3 plantas sobre rasante, razón por la cual la mayoría de los edificios se clasifican como estructuras de baja altura.

En cuanto a la peligrosidad sísmica, cerca del 23% se encuentra en roca firme (suelo tipo A), Un 17% en suelo tipo B y un 48% en suelo tipo B'. Mientras que el 12% restante se encuentra ubicado en suelo Tipo E. Al considerar los tipos de suelo, para un periodo de retorno de 475 años, el 45% están expuestos a PGA's menores que 0.08g. Alrededor del 43% están expuestos a PGA's entre 0.08 y 0.12g. Un 9% de los edificios están expuestos a PGA's entre 0.12g y 0.14g. Un porcentaje cercano al 3% se encuentra expuesto a PGA's entre 0.14g y 0.2g. Para periodos de retorno de 975 años, cerca del 45% están expuestos a PGA's menores a 0.1 g. El 43% de los edificios están expuestos a PGA's entre 0.1g y 0.14g. El restante 13% de los edificios están expuestos a PGA's entre 0.1g y 0.22g.

De los resultados de la evaluación de la seguridad, todos los centros educativos cumplen con el requisito de seguridad de la vida para un periodo de retorno de 975 años. Para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 68% de los edificios tienen daños entre nulos y leves; alrededor del 27% tienen daños entre leves y moderados. Muy pocos (5%) tienen daños mayores al estado moderado y no cumplen con el nivel de comportamiento *Operacional*. Para un periodo de retorno de 975 años, todos los edificios analizados cumplen con el requisito de *Seguridad de la Vida*.

Como complemento al análisis de seguridad, se estimaron las pérdidas económicas, la funcionalidad y el tiempo de recuperación para los centros educativos estudiados. El valor promedio de pérdida económica de los centros educativos de la provincia de Girona es del 14% del valor de reposición para un periodo de retorno de 475 años y del 17% al considerar el periodo de retorno de 975 años.

En cuanto a su funcionalidad, se observa que, para ambos periodos de retorno considerados, cerca del 30% de los edificios tienen un índice de funcionalidad menor a 0.5. Por último, cerca del 90% de las instalaciones tienen un periodo de recuperación entre 0 y 150 días para un periodo de retorno de 475 años, mientras que para 975 años este porcentaje se reduce a 70%. Los edificios restantes tienen un periodo de recuperación entre 150 y 200 días.

A pesar del alcance del análisis, se debe recalcar que las pérdidas potenciales de las escuelas pueden representar costos de oportunidad considerables para el sector educativo. En este sentido, se considera necesario discutir los estándares de seguridad establecidos para estas instalaciones en la Norma de Construcción Sismoresistente Española NCSE-02. Así mismo, se sugiere incluir en la planificación de la construcción de la infraestructura educativa y en las guías de construcción de nuevos centros educativos, tanto la seguridad de los alumnos, así como los valores esperados de las pérdidas frente al peligro sísmico.

Referencias

- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A. and Bommer, J. J. (1996) "Prediction of horizontal response spectra in Europe" Earthquake Engineering and Structural Dynamic,s 25, 371-400.
- ATC-40 (1996) "Seismic evaluation and retrofit of Concrete Buildings". Vol 1. Applied Technology Council. Redwood City. California.
- Barbat, A.H., Pujades, L.G., Lantada, N., Moreno, R. (2008) "Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, 851-865.
- Colas, B., Goula X., Roullé A., I. Garcia, P. Buxo, I. Roviro, J., Dewez T., Nus, E. (2013). Shake-Map Site effect corrections. Sispyr Report R10.
- Cornell, C. A. (1968) "Engineering Seismic Risk Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, 58, 1583-1606.
- EN-1998-1 (2004) "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 1 General rules, seismic actions and rules for buildings". English version. 232 pp.
- FEMA 227 (1992) "A benefit/cost model for the seismic rehabilitation of buildings". Federal Emergency Management Agency, Vols 1, 2. VSP Associates, Sacramento, California.
- FEMA 273 (1997) "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings" (FEMA Publication 273). Informe preparado por el Building Seismic Safety Council.[En línea]. Disponible en http://www.wbdg.org/ccb/DHS/ARCHIVES/fema273.pdf [Última consulta 25/09/2012].
- FEMA 356 (2000) "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings". [En línea]. Informe preparado por Federal Emergency Management Agency y American Society of Civil Engineers Disponible en: http://www.fema.gov/library/file;jsessionid=F7FEA142417F630D5FC19FC7A769 E41C.WorkerLibrary?type=originalAccessibleFormatFile&file=fema_356_1_.txt&fileid=14a09980-7056-11dc-8099-000bdba87d5b [Última consulta 25/09/2012].
- FEMA 395 (2003)"Incremental seismic rehabilitation of school buildings (K-12) Providing protection to people and buildings". Risk Management Series. Federal Emergency Management Agency. [En línea]. Disponible en: http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1980. [Última consulta 11/11/2012]
- FEMA 396 (2003)"Incremental seismic rehabilitation of Hospital buildings Providing protection to people and buildings". Risk Management Series. Federal Emergency Management Agency [En línea]. Disponible en: http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1981. [Última consulta 11/11/2012]
- FEMA/NIBS (1999). "Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS® 99". Federal Emergency Management Agency FEMA. Washington, D.C.
- FEMA/NIBS (2003) "Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model HAZUS®MH MR4" Technical Manual. Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response Directorate, Mitigation Division and National Institute of Building Sciences Washington, D.C.

- GEOTER (2008) "Calcul probabilista de la perillositat sísmica a Catalunya en acceleracions espectrals" Document GTB/IGC/0508-001. Institut Geològic de Catalunya. C/Balmes, 209-211 08006 Barcelona, España.
- Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., Secanell, R. (1998) "Informació territorial i anàlisi del risc pel Pla SISMICITAT. Part I: perillositat sísmica". Instituto Cartográfico de Cataluña. Barcelona.
- Grossi, P., kunreuther, H. (2005) "Catastrophe modeling: a new approach to managing risk". Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- IGC (2010) "Formularis per a l' avaluació de la vulnerabilitat sísmica d'edificis essencials". Informe IGC GS-11/2010. Institut Geològic de Catalunya. C/Balmes, 209-211 08006 Barcelona, España.
- IGC (2011) "Mapa de mesozonació sísmica de Catalunya (1:100.000), adaptat a la classificació EC-8". Informe IGC GS-008/11. Institut Geològic de Catalunya. C/Balmes, 209-211 08006 Barcelona, España.
- Irizarry, J. (2004). An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System of Barcelona. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. España. 406 pp.
- Irizarry, J., Lantada, N., Pujades, L.G., Barbat, A.H., Goula, X., Susagna, T., Roca, A. (2010) "Groundshaking scenarios and urban risk evaluation of Barcelona using the Risk-UE capacity spectrum based method". Bulletin of Earthquake Engineering, 9(2), 441-466.
- Lantada, N. (2007). Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Lantada, N., Pujades, L.G., Barbat, A.H. (2009) "Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison". Natural Hazards, 51, 501-524.
- Martin, Ch., Secanell, R. and Lignon, G (2002) "Automation of the seismic hazard calculation by means of probabilistic approaches. Preliminary results in France". Proc. III asamblea Hispano- Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Valencia, 2002.
- Milutinovic, Z.V. and Trendafiloski, G.S. (2003). *WP04. Vulnerability of current buildings.* Risk-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns. Contract No. EVK4-CT-2000-0014. Skopje: Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS). September 2003 (111 pp).
- McGuire, R., (1976) "EQRISK. Evaluation of earthquake risk to site. Fortran computer program for seismic risk analysis". Geological. Open File. Report 76-67; 92 pp.
- Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P., y otros. (2004). *The European Risk-Ue Project: an advanced approach of earthquake risk scenarios*. Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering. Vancouver B.C (Canadá). CD-ROM. Paper No. 2162, 12 pp.
- Pitilakis K., Alexoudi M.; Argyroudis.S; Anastasiadis A. (2006) "Seismic Risk Scenarios For An Efficient Seismic Risk Management: The Case Of Thessaloniki (Greece)" Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction, 66, 229-244. Springer Netherlands, ISBN: 978-1-4020- 4571-4.

- Rodríguez, J. (2010) Creación de una base de datos SIG de la Val d'Aran, orientada a la evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. *Trabajo de final de carrera*. *Universitat Politècnica de Catalunya*. Barcelona, Octubre 2010.
- Rossetto, T., Elnashai, A. (2003) "Derivation of vulnerability functions for Europeantype RC structures based on observational data". Engineering Structures, 25, 1241–1263.
- SEAOC (1995) "Performance based seismic engineering of buildings". VISION 2000 Committee. Structural Engineering Association of California. Sacramento, CA.
- Secanell, R., D. Bertil, D., C. Martin, C., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Dominique, P., Carbon, D. Fleta, J (2008) "Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region". Journal of seismology, 12,323–341.
- Susagna, T., Goula, X., Roca, A., Pujades, L., Gasulla, N., y Palma, J. (2006). Loss scenarios for regional emergency plans: application to Catalonia. Spain.
- Tapia, M. (2006) "Desarrollo y aplicación de métodos avanzados para la caracterización de la respuesta sísmica del suelo a escala regional y local." Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 355 pp
- Valcárcel, J.A. (2013) Análisis y gestion del riesgo s'simico de edificios y sistemas esenciales. *Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.* Barcelona, febrero 2013.
- Woo, G., (1996) "Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modelling". Bulletin of the Seismological Society of America, 86(2), 353-362

Anexos

Anexo A: Formularios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos

En este Anexo se presentan los Formularios para la evaluación de la vulnerabilidad de centros educativos, considerados útiles para realizar inspecciones visuales rápidas y recopilar información de interés para el análisis de vulnerabilidad y estimación de daños. A su vez, se presentan se presentan guías y documentos técnicos para rellenarlos.

- Formulario 1: permite recopilar información general de las instalaciones en cuanto a su dirección, personal de contacto, servicios ofrecidos.
- Formulario 2: permite recopilar información sobre las propiedades estructurales de los edificios
- *Instrucciones para rellenar los formularios:* en este documento se presentan guías para rellenar los campos incluidos en los Formularios 1 y 2, en cuanto a la información solicitada y criterios de calificación.
- *Anexo Técnico*: en este documento se presentan mayores detalles e información de soporte para rellenar el Formulario 2, en cuanto a la clasificación de los sistemas constructivos, el tipo de forjado, las irregularidades en planta y en altura, entre otros detalles estructurales.



Formularios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos

Formulario 1	ID ^(**)	IGC
Datos básicos	Pág. 1 de 2	Institut Geològic
		de Catalunya

Nombre del centro (*) Página web Persona de contacto (*) Dirección (*) Municipio (*) Código postal (*) Teléfono (*) Comarca Servicios territoriales (*) Número de edificios del centro (*) Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes Parvulario	
Persona de contacto (*) Persona de contacto (*) Persona de contacto (*)	
Persona de contacto (*) Calle (*)	
Calle (*) Número (*) Número (*) Municipio (*) Código postal (*) Teléfono (*)	
Número (*) Número (*) Municipio (*) Código postal (*) Teléfono (*) Comarca Servicios territoriales (*) Número de edificios del centro (*) Oferta de servicios Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
Dirección (*) Municipio (*) Código postal (*) Teléfono (*) Comarca Servicios territoriales (*) Número de edificios del centro (*) Oferta de servicios Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
Código postal ** Teléfono ** Comarca Servicios territoriales ** Número de edificios del centro ** Oferta de servicios Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
Teléfono (*) Comarca Servicios territoriales (*) Número de edificios del centro (*) Oferta de servicios Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
Comarca Servicios territoriales (*) Número de edificios del centro (*) Oferta de servicios Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
Servicios territoriales (*) Número de edificios del centro (*) Oferta de servicios Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
Número de edificios del centro (*) Oferta de servicios Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
Oferta de servicios Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
Público Privado ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
ESO (Ed. Sec. Obligatoria) Hogar de infantes	
(4)	
Tipos de Centro (*) Bachillerato Parvulario	
FP de grado medio Educación primaria	
Educación especial Otros (especificar al reverso)	
Número de plazas ^(*)	
Vista en planta del centro	
Croquis de la planta del centro:	

^(**) Campos obligatorios.
(**) Campos a rellenar por personal técnico.



Formularios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos

Formulario 1	$ID^{(**)}$		100
Datos básicos	Pá	ig. 2 de 2	IGC Institut Geològic de Catalunya

Observaciones



Formularios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos

Formulario 2	$ID^{(**)}$		de	
Datos de la estructura		Pág. 1	de 2	



FORMULARIO 2: DATOS DE LA ESTRUCTURA DEL EDIFICIO ♥						
Centro						
Edificio Múmero total de edificios del centro E.						
	Área total	(m^2)				
Número d	e plantas del ed		Total		Sobre rasante	Bajo rasante
	Valor cata	stral	<u>l</u>			
V	Valor de los equipos y contenidos					
			Año o periodo	de con	strucción	
Año de construcción						
Periodo de	construcción					
Antes	de 1962	En	tre 1975 y 1994	П	Después del 2002	
	1962 y 1974 [_	tre 1995 y 2002		Sin información	
Tipología estructural						
Muros de carga de mampostería la M3.3 Con forjados mixtos de acero y mampostería						
reforzada M3.4 Con forjados de losas de hormigón armado						
	Estructuras de RC 3.1 Estructuras regulares con tabiquería de mampostería					
hormigón	hormigón ² armado RC 3.2 Estructuras irregulares con tabiquería de mampostería					
Estructura	Estructura metálica S1 Estructuras metálicas resistentes al momento			ento		
Otro	os 🗌	Espec	ificar en el reverso	de esta	hoja	
Detalles estructurales						
Irregularidad en planta 🔲 Baja 🔲 Mediana 🔲 Alta						
Irregularidad en altura 🔲 Baja 🔲 Mediana 🔲 Alta						
Pilar corto Sí No						
Posibili	Posibilidad de golpeteo 🔲 Sí 💮 No					
Muros con aberturas excesivas (Sólo en caso de edificios que tengan muros de carga, muros pantalla a cortante o similares, evaluar si existen muros con aberturas excesivas) Sí No						

Ψ Ver las instrucciones para rellenar el Formulario 2.

^(**) Campos a rellenar por personal técnico de soporte

El término *mampostería* tiene un sentido amplio que incluye las fábricas hechas con piedras o ladrillos pero principalmente nos referimos aquí a la obra de fábrica de tocho o ladrillo macizo.
 Típicamente, las estructuras de los edificios de *hormigón armado* en Cataluña tienen pilares y forjados de

Típicamente, las estructuras de los edificios de hormigón armado en Cataluña tienen pilares y forjados de losas de hormigón. Entre las losas de hormigón son típicas las losas aligeradas con casetones y armadura bidireccional. Estos tipos de forjados se denominan también forjados reticulares.



Formularios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos

Formulario 1	ID ^(**)	100
Datos básicos	Pág. 2 de 2	IGC Institut Geològic
		de Catalunya

Daños previos						
Asentamientos diferenciales Sí No						
Fisuras en elementos estructurales Sí No						
Otros Especificar:						
			Reformas estructurales			
Reformas estru	ıctural	es para i				
Reformas estructurales para reparar el edificio Sí No Reformas estructurales para redistribuir espacios Sí No						
Especificar, si es	s posib	le, las ca	racterísticas y años de las intervenciones:			
			Otras tipologías estructurales (**)			
		M3.1	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera			
Manager		M3.2	Muros de carga de mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería			
Mampostería		M4	Muros de carga de mampostería reforzada o confinada			
		M5	Edificio de mampostería rehabilitado			
		RC1	Estructuras de hormigón resistentes a momento			
Hormigón armado		RC2	Muros de cortante de hormigón armado			
		RC4	Sistemas duales con muros y pórticos de hormigón armado			
		RC5	Muros de hormigón prefabricado			
		RC6	Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón			
		S2	Estructuras metálicas arriostradas			
Estructura		S3	Estructuras metálicas con tabiquería de mampostería no reforzada			
metálica		S4	Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados "in situ"			
		S5	Sistemas o estructuras mixtas de acero y hormigón armado			
Madera		W	Estructuras de madera			
Observaciones						
- Object vaciones						

Instrucciones para rellenar los formularios para el análisis de la vulnerabilidad sísmica de los centros educativos UPC-IGC

El objetivo de este documento es proporcionar pautas para rellenar los formularios de recogida de información general básica (Formulario 1) y datos más específicos del edificio (Formulario 2). Estos datos se orientan al análisis de la vulnerabilidad sísmica de los centros educativos de acuerdo a un método simplificado. Denominaremos este método como Método de Nivel 2 Simplificado (N2S). El método N2S hace uso de espectros de capacidad y matrices de probabilidad de daño y fue propuesto en el año 2007 por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) a partir de las aportaciones del proyecto Risk-UE y por encargo del Instituto Geológico de Cataluña (IGC). Una aplicación eficiente del método N2S requiere disponer de información que permita clasificar los edificios de acuerdo a tipos estructurales. Esta información puede contener aspectos técnicos relacionados con la arquitectura y el análisis estructural; en consecuencia, se prevé que en el proceso de recogida de datos participe personal técnico experto. Por este motivo es importante que haya una persona de contacto para coordinar esta primera fase informativa del proceso de análisis sísmico del centro educativo. Los formularios 1 y 2 pueden contribuir a que la recogida de estos datos sea sencilla. Así entonces, estas instrucciones son una ayuda para rellenar ambos formularios y por lo tanto, contienen información sobre las propiedades relevantes que se pretenden caracterizar. El Formulario 1 ha de permitir identificar y situar el centro en el territorio, conocer si se aloja en un solo edificio o tiene una estructura modular y determinar el tipo de estudios y niveles educativos que imparte, así como tener una estimación del valor económico. El Formulario 2 recoge información sobre las principales características estructurales, arquitectónicas y geométricas de los edificios que componen el centro y ha de permitir cuantificar su vulnerabilidad sísmica, por lo cual hace falta establecer su clasificación de acuerdo a las tipologías estructurales estándar. Se muestra a continuación una breve descripción de los formularios. Después siguen las instrucciones para rellenar sus campos.

> Formulario 1: datos básicos del centro educativo.

Esta información ha de permitir crear un registro de información general de los centros educativos. A partir de este formulario se podrá establecer un referente de de los valores expuestos, incluyendo, para cada centro, información sobre el número de edificios que lo componen, los tipos y niveles de enseñanza que imparten, sobre su capacidad y sobre su valor económico.

> Formulario 2: datos de la estructura de los edificios.

A partir de esta información se establecen criterios que permiten clasificar el edificio de acuerdo a las tipologías estructurales previstas en el método N2S.

Instrucciones para rellenar el formulario 1: Datos básicos del centro educativo ^{3,4}

El objetivo del Formulario1 es identificar los datos generales del centro, en particular aquellos que hacen referencia a su ubicación en el territorio y a los servicios territoriales a los cuales pertenecen, a su capacidad y al tipo y niveles de estudios que ofrecen. Hace falta conocer también si el centro educativo se aloja en un solo edificio o tiene una estructura modular. Aún así se considera vital disponer de una persona de contacto para recoger otra información complementaria que se pueda considerar adecuada.

Campo	Descripción
Nombre del centro educativo	Denominación oficial del centro educativo.
Página web	Dirección URL de la página electrónica del centro.
Persona de contacto	Se solicita el nombre y los datos de contacto de una persona que pueda dar soporte al personal experto para recoger la información complementaria (si es el caso) Es recomendable que la persona de contacto sea la misma persona responsable de rellenar el formulario.
Dirección	Dirección completa incluyendo como mínimo: calle, número, municipio, código postal y teléfono de atención al público o centralita.
Comarca	Comarca a la cual pertenece el municipio en donde se encuentra el centro.
Servicios Territoriales	Servicios Territoriales a los que pertenece el centro, de acuerdo a las regiones que establece el Departamento de educación ³ de la Generalitat de Cataluña en su organigrama.
Número de edificios del Centro	Es necesario distinguir si el centro se aloja en un solo edificio o se compone de diferentes módulos. En éste último caso hace falta emplear la parte de observaciones para indicar las características principales y la importancia de los diferentes módulos en el funcionamiento del centro.
Tipo de centro	Es necesario indicar si el centro es privado o público y los tipos y niveles de estudios que ofrecen. Eventualmente en este apartado se pueden señalar varias casillas cuando el centro imparta diferentes niveles o diferentes tipos de estudio. Si se marca la casilla <i>otros</i> es necesario especificar en el espacio reservado para observaciones al respaldo.
Número de plazas	Número total de alumnos del centro.
Vista en planta del centro	Croquis esquemático de la planta de los edificios. Hace falta también asignar un identificador a cada edificio. Este identificador se usa en el formulario 2.

La terminología empleada en referencia a los tipos de estudios y a los niveles formativos se ha adaptado a la información disponible en el apartado "Consulta de centres educatius" de la página web del Departamento de Educación de la Generalitat de Catalunya. http://www20.gencat.cat/portal/site/Educacio [Consulta: 21 Abr. 2010].

⁴ Generalitat de Catalunya. Equipamientos [en línea]. Buscador de equipamientos de Cataluña. Disponible en: http://www20.gencat.cat/portal/site/Equipaments. [Consulta: 07 Feb. 2010].

Instrucciones para rellenar el formulario 2 Datos sobre la estructura

El objetivo del Formulario 2 es identificar y caracterizar las propiedades estructurales de cada uno de los edificios que componen el centro con el fin de analizar su vulnerabilidad y fragilidad sísmica. Por esta razón es importante indicar cuántos edificios pertenecen al centro. Es necesario rellenar un Formulario 2 para cada edificio. Como se ha comentado más arriba, este formulario contiene información técnica y se prevé la participación de personal de soporte, experto en estructuras, para esta primera fase de recogida de información. Es por esto que es importante que, en el Formulario 1, se faciliten los datos de una persona de contacto a quién se pueda dirigir el técnico de soporte. Se recomienda que la persona de contacto coincida con la persona del centro, responsable de rellenar los formularios. Se dan a continuación las instrucciones y pautas para ayudar a rellenar los diferentes campos de este segundo formulario.

Centro

Denominación oficial del centro. Ha de coincidir con el nombre del centro del Formulario 1.

Edificio

Identificación del edificio: nombre, código o palabra clave que permita identificar, sin ambigüedad, el edificio. Hace falta usar la misma clave que en el croquis del Formulario 1, indicando el número de orden del edificio al cual corresponde el formulario y el número total de edificios que componen el centro educativo. El nivel del estudio de vulnerabilidad y la fiabilidad de los resultados dependen del grado de información disponible sobre el edificio. Es importante que la persona de contacto pueda facilitar al personal técnico de soporte el acceso a la documentación gráfica del edificio, que puede incluir fotografías y planos estructurales y arquitectónicos.

Área total (m²)

Superficie total construida del edificio, en unidades de metros cuadrados.

Número de plantas del edificio

Se debe establecer el número total de plantas del edificio, diferenciando entre el número de plantas sobre rasante (incluyendo la planta baja) y el número de plantas bajo rasante.

Valor catastral

Valor catastral del edificio, en euros (€).

Valor de los equipos y contenidos

Valor estimado en euros (€) de los equipos y contenidos del centro, incluyendo, entre otros, los equipos y material docentes, el mobiliario, la infraestructura informática y el material de oficina.

Año o periodo de construcción

Año en el cual fue construido el edificio. Si no se conoce, marque la casilla del periodo que corresponda. En caso de que no se conozca tampoco el periodo, marque la casilla "sin información".

Tipología estructural

En este apartado, es necesario escoger el tipo de estructura que representa de manera adecuada al edificio, de acuerdo a la matriz de tipos estructurales de los edificios típicos de Europa que se estableció en el marco del proyecto Risk UE y que se resume en el Anexo Técnico. Estas tipologías constructivas se definieron principalmente por medio de la combinación de propiedades estructurales y geométricas.

El material constructivo, el sistema resistente a cargas verticales y horizontales y el tipo de forjado se consideran propiedades estructurales. El número de pisos y la altura del edificio son propiedades geométricas. Este apartado hace referencia a las propiedades estructurales. Más abajo se consideran otras propiedades. En el caso que el edificio no encaje en las estructuras más frecuentes que hay en este apartado, hace falta señalar la casilla "otras". En el reverso de la hoja encontrará otras tipologías constructivas, menos frecuentes al caso nuestro que, eventualmente, pueden corresponder mejor a su centro. En el Anexo Técnico se entrega una relación completa de la matriz de tipos constructivos y también información más detallada y cuantitativa para ayudar en este importante proceso de asignación de tipos al edificio. Un error en la asignación de la tipología estructural puede desajustar todo el estudio, por tal motivo se insiste en la necesidad de que el personal del centro y el personal técnico experto se coordinen.

Detailes estructurales

Además de la clasificación del edificio en una tipología estructural, es necesario recoger información sobre otras características asociadas a la configuración arquitectónica de los edificios, incluyendo la geometría en planta y en altura, así como otros detalles estructurales de interés para el análisis de su respuesta sísmica. En este apartado es necesario definir las principales características que pueden afectar el comportamiento dinámico del edificio. Esta definición se puede hacer con base en modelos simplificados pero, en caso de duda, en el Anexo Técnico se encuentran criterios más cuantitativos, ejemplos, ilustraciones y otros criterios que pueden ser de utilidad para definir estos detalles estructurales.

Irregularidad en planta

Marque la casilla "Baja" cuando la planta es rectangular, la relación entre la longitud máxima y la longitud mínima de la planta es menor que cuatro y la distribución de masas y rigideces es homogénea. Marque la casilla "Mediana" en el caso que la planta del edificio tenga entrantes o salidas de una longitud inferior al 20% de la longitud máxima de una hipotética planta rectangular que cumple la condición de regularidad anterior. Marcar la casilla "Alta" en cualquier otro caso.

Irregularidad en altura

Marque la casilla "Baja" cuando no se observen cambios bruscos de masa o rigidez entre diferentes niveles del edificio. Marque la casilla "Alta" cuando el edificio tenga una planta más alta que las restantes o cuando haya discontinuidades o interrupciones de elementos verticales resistentes. Marque la casilla mediana en cualquier otro caso.

Pilar corto

Marque la casilla "Sí" cuando se identifiquen pilares o secciones de pilares, cuya altura sea inferior al 30% de la altura de la planta o piso. (Ver también el Anexo Técnico).

Posibilidad de golpeteo

Marque la casilla "Sí" cuando la separación entre dos edificios contiguos sea inferior al producto D×N, en dónde D vale 3 cm y N es el número de plantas del edificio más bajo. En caso de edificios de igual altura, N es el número de plantas de cualquiera de los dos edificios.

Muros con excesivas aberturas

Marque la casilla "Si" cuando la superficie de las aberturas es igual o mayor que el 50 % de la superficie del muro.

Daños existentes

En este apartado se trata de establecer la pérdida de capacidad resistente del edificio por causa de deformaciones del terreno o por causa del deterioro de elementos estructurales.

Asentamientos diferenciales

Marque la casilla "Sí" cuando se observen hundimientos de diferente profundidad entre, al menos dos, es a decir dos o más, secciones del edificio.

Fisuras en elementos estructurales

Marque la casilla "Sí" cuando se observen fisuras en elementos estructurales.

Reformas estructurales

Se trata de identificar intervenciones en, o reformas del edificio que puedan haber producido cambios significativos en el sistema resistente de la estructura.

Reformas estructurales para reparar el edificio

Marque la casilla "Sí" cuando la reforma se haya efectuado para reparar el edificio.

Reformas estructurales para redistribuir espacios

Marque la casilla "Si" cuando se considere que las intervenciones para redistribuir los espacios del edificio hayan afectado elementos estructurales.

Otras tipologías estructurales

Es necesario rellenar este apartado sólo en los casos en los cuales la estructura del edificio sea diferente de las propuestas en el apartado destinado a identificar la tipología estructural. Se insiste en la importancia de una participación explícita y directa de un técnico de soporte, con conocimientos de estructuras, en la definición y asignación de la tipología estructural del edificio. Este aspecto es particularmente relevante cuando se trata de un tipo de edificio poco frecuente. En el Anexo Técnico se entrega información específica de soporte.

Anexo Técnico

Documento de soporte para rellenar los formularios para el análisis de la vulnerabilidad sísmica física de los centros educativos UPC-IGC

Introducción

Este Anexo Técnico complementa las instrucciones para llenar los formularios para el análisis de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos y aporta otros aspectos conceptuales, cualitativos y cuantitativos relacionados con las características de los edificios. La palabra *Edificio*⁵ significa hacer fuego y proviene de la palabra indoeuropea æde (fuego) y del latín facere (hacer). Nos estamos refiriendo directamente a este significado cuando hablamos de la palabra hogar. Ambas palabras recuerdan el refugio y habitáculo rudimentario de nuestros antepasados en el cual se mantenía vivo un fuego que no era nada fácil de encender. Más cerca de la idea de edificio en el contexto que nos ocupa es la acepción inglesa building que significa cualquier estructura hecha por el hombre. Así, cuando hablamos de edificios nos referimos a un amplio abanico de construcciones que incluyen, además de las viviendas, aquellas otras que se diseñan para acoger diferentes actividades destinadas a servicios básicos, como la sanidad y el enseñamiento, pero también a otras funciones como, por ejemplo, aquellas relacionadas con la industria, el comercio, la religión, la cultura y el esparcimiento. Hoy en día, los edificios son de una considerable complejidad técnica y pueden incorporar, en su diseño y construcción, aspectos arquitectónicos y artísticos que van más allá de su función. Aún así la construcción de edificios singulares se ha convertido en un reclamo de prestigio y exclusividad distintiva de ciudades y culturas. Estos edificios son excepcionales. La clasificación de los edificios normales se suele basar en los materiales constructivos, en el sistema básico resistente a cargas verticales y horizontales, en los forjados, y en otras propiedades, entre las que se destacan las características arquitectónicas y geométricas relacionadas con su estética y con su configuración en planta y en altura. Con mayor o menor medida, todas estas características afectan la respuesta sísmica de los edificios. Las clasificaciones de edificios permiten agrupar los edificios en características similares y simplificar los estudios que requieran valoraciones estadísticas de grandes poblaciones de inmuebles. Una clasificación de edificios se denomina matriz tipológica. Al final de este documento se muestra la matriz de tipologías establecida en el proyecto Risk UE (Lungu et al. 2003) que permite identificar los edificios típicos de Europa. Así entonces, el objetivo de este documento es proporcionar información que permita poner un edificio concreto dentro de unas de las clases de esta matriz. Aún así, un análisis cuidadoso de la vulnerabilidad sísmica de un edificio requiere conocer su grado o nivel de protección sísmico para lo cual puede ser suficiente saber su fecha de construcción. En estos casos es fundamental conocer la normativa vigente, el grado de seguimiento y el control de su complimiento. Así entonces se describen aquí los principales sistemas resistentes, los materiales constructivos y los tipos de forjados de uso frecuente en la construcción, pero también se presentan criterios y fórmulas cuantitativas que han de permitir establecer otras propiedades geométricas y sismo resistentes de los edificios que alojan centros educativos.

Sistemas resistentes a cargas

La estructura de un edificio es un conjunto de elementos que interaccionan con el objetivo de distribuir y resistir las cargas internas y externas que se espera soporte durante su vida útil. El

⁵ Edificio: fuente http://es.wikipedia.org/wiki/Edificio.

sistema resistente a cargas, hace referencia al conjunto de elementos que conforman la estructura del edificio, así como a su distribución e interacción para garantizar su estabilidad y resistencia frente a las acciones gravitacionales y eventuales fuerzas laterales. Pueden existir muchos sistemas resistentes a cargas pero los más frecuentes cuando se habla de edificios son: los pórticos resistentes a momento, los pórticos arriostrados, los muros de carga o muros resistentes y los sistemas duales.

Pórticos resistentes a momento

Los elementos básicos de este sistema estructural son pilares y vigas que se unen para formar pórticos que soportan las cargas verticales y horizontales. Los puntos de unión pilar – viga, se denominan nudos. En este edificio los diafragmas transfieren y distribuyen las cargas entre los pórticos. En una inspección visual rápida de este tipo de edificios se observan patrones de mallas rectangulares en las fachadas y/o grandes aberturas para las ventanas en todos los costados del edificio. La Figura A 1 muestra un ejemplo de edificio de pórticos resistentes a momento. Una descripción más detallada de la estructura puede requerir identificar si los vacíos de los pórticos están llenos con tabiquería de mampostería o con otros tipos de materiales.

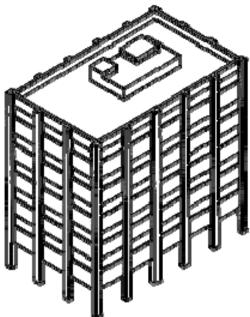


Figura A 1 Ejemplo de un edificio de pórticos resistentes a momento.

Fuente: FEMA (2002)

Pórticos arriostrados

Este sistema estructural está compuesto de pórticos de pilares y vigas, conectados con elementos de riostra. La Figura A 2 muestra ejemplos de configuraciones sencillas de pórticos de arriostrados. La Figura A 3 muestra otros ejemplos de este tipo de sistemas resistentes en edificios. A pesar de que cualquier tipo de edificio puede incorporar sistemas de riostras, estos son más frecuentes en edificios metálicos.

Muros de carga

En este sistema estructural las fuerzas laterales son soportadas por muros. Estos muros se denominan muros de carga o muros resistentes a cortante. En una revisión visual rápida, estos edificios suelen evidenciar al menos dos muros sólidos, de pocas aberturas y de mayor grosor. La Figura A 4 muestra un ejemplo de edificio con muros resistentes.

Sistemas duales

En los edificios con este sistema resistente hay pórticos y muros. Es frecuente que los muros estructurales estén en una dirección ortogonal a los pórticos. La Figura A 5 muestra un ejemplo de una estructura dual.

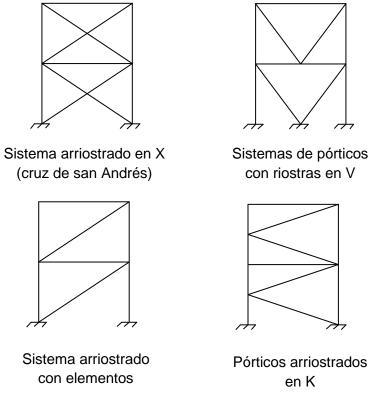


Figura A 2 Esquemas sencillos de pórticos arriostrados. Fuente: Bermúdez (2010).

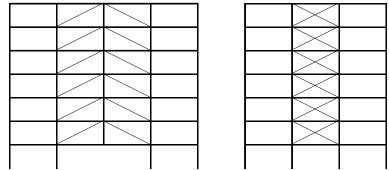


Figura A 3 Otros esquemas de edificios más complejos con pórticos arriostrados con elementos diagonales.

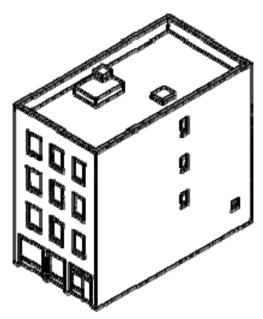


Figura A 4 Ejemplo de un edificio con muros resistentes. Fuente FEMA (2002).

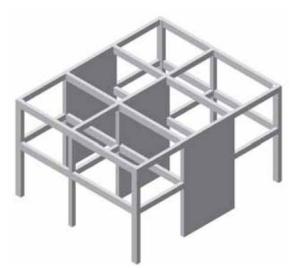


Figura A 5 Esquema de una estructura dual de muros resistentes a cortante y pórticos resistentes a momento.

Fuente: Barbat et al. (2007).

Materiales constructivos

La mayor parte de los edificios existentes en Cataluña han sido construidos entre finales del siglo XIX y durante el siglo XX y las estructuras más frecuentes son de mampostería, de hormigón armado o metálicas. Se describen a continuación los diferentes subtipos de edificios de cada una de estas categorías.

Mampostería

La palabra inglesa "masonry" significa "obra hecha de ladrillos, bloques o sillares unidos con mortero u otro material aglomerado, formando una disposición ordenada". El diccionario de la

lengua catalana define *maçoneria* como *obra de cal y piedra picada* y habría que traducir "*masonry*" por *fàbrica* en Catalán y *fábrica* en Castellano. El "*Diccionari visual de la construcció*" (GenCat, 2001) dedica su tercer capítulo a este tipo de edificios que definen como edificios de obra de fábrica. Pese a esto, tanto en los formularios como en los documentos complementarios se mantiene mampostería por similitud con la palabra inglesa, ampliamente empleada en la literatura especializada. La Enciclopedia Catalana apoya a esta opción cuando define *mampostería* como "*Obra hecha con piedras o ladrillos, generalmente unidos con un material de cohesión (cal, cemento, etc)*". En general, cuando hablamos de mampostería, sin especificar, nos referimos a obra hecha con ladrillos unidos con mortero, que es típico de muchos edificios de Cataluña. En general el sistema resistente estructural de los edificios de mampostería es de muros o paredes de carga pese a que puede haber sistemas duales y mixtos. Se describen a continuación los principales tipos de edificios de mampostería atendiendo al tipo de paredes.

Mampostería no reforzada

En estos edificios la estructura está hecha con paredes portantes de fábrica de ladrillo de cerámica cocida que pueden ser macizos o no. Estos ladrillos están unidos por medio de mortero. El mortero puede ser de diferente calidad. La Figura A 6 muestra ejemplos de muros de mampostería no reforzada.



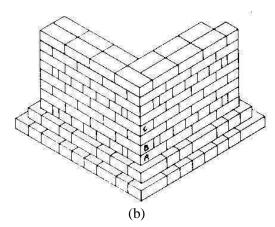


Figura A 6 Ejemplo de secciones de muros de mampostería no reforzada.

Fuentes:

a) http://www.remodelinglibrary.com/images/brick.ipg.

Fuentes: a) http://www.remodelinglibrary.com/images/brick.jpg,
b) http://www.world-housing.net/uploads/100494 021 06.jpg⁶

Mampostería reforzada

A diferencia de los muros de mampostería no reforzada, la mampostería reforzada usa redondos de acero que confinan y ligan los ladrillos que la componen. Este tipo de paredes pertenecen a las denominadas *paredes de cerámica armada*. Las unidades de mampostería suelen ser piezas perforadas como ladrillos o bloques de hormigón (shunts) y se disponen de forma que permiten la continuidad de los redondos los cuales quedan encajados y embebidos dentro del mortero, reforzando el muro. Además de los redondos de refuerzo vertical, también puede haber mallas de refuerzo horizontal. La Figura A 7 muestra un ejemplo de construcción de mampostería reforzada. Este tipo de mampostería es poco frecuente en Cataluña.

World Housing Encyclopedia, *Housing Reports*. EERI y IAEE. http://www.world-housing.net (Última consulta: 17 de marzo de 2010].

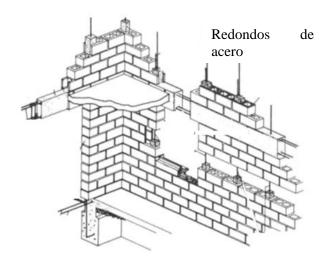


Figura A 7 Ejemplo de obra de mampostería reforzada hecha con bloques de hormigón, que corresponde a un edificio de Chile

(Fuente: http://www.world-housing.net/uploads/100098_005_02.jpg).

Mampostería confinada

En este tipo de obra, también poco frecuente en nuestro caso, la mampostería está confinada, es decir, elementos rígidos de mampostería llenan los espacios definidos por sistemas de hormigón armado convencional como, por ejemplo, marcos formados por pilares y vigas que, eventualmente, pueden ser estructurales. La Figura A 8 muestra un ejemplo de este tipo de elementos que conforman la mampostería confinada.

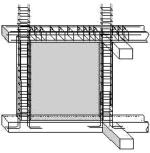


Figura A 8 Ejemplo de elemento para confinar la mampostería. En color gris se observa el espacio en donde está el panel de mampostería.

(Fuente: http://micigc.uniandes.edu.co/VIS/mamposte.htm)

Edificios rehabilitados

Son edificios de mampostería en los cuales se han llevado a cabo obras de reforma, en general para mejorar su capacidad portante o resistente. Estas reformas eventualmente pueden perseguir explícitamente reducir la vulnerabilidad sísmica. Algunos ejemplos de estos tipos de intervenciones son:1) Inclusión de nuevos forjados de hormigón armado con armadura continua en las vigas y losas rígidas, 2) revestimiento, con hormigón armado, de paneles o paredes de mampostería, 3) construcción de vigas y pilares de hormigón armado en todo el espesor del muro con el fin de

Centro de vivienda de interés social. VIS: Inventario de sistemas constructivos. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. http://micigc.uniandes.edu.co/VIS/centrovis.htm. [Última consulta: 07 Feb 2010].

⁸ Centro de vivienda de interés social. VIS: Inventario de sistemas constructivos. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. http://micigc.uniandes.edu.co/VIS/centrovis.htm. [Última consulta: 07 Feb 2010].

confinar la mampostería con un bastidor no resistente a momento, 4) fajas armadas y 5) inserción de un bastimento de acero en todo el grueso de la pared.

Hormigón armado

El hormigón es un material de construcción que se obtiene de la mezcla entre el cemento, áridos y agua. Hay diferentes tipos de cementos aglomerantes, actualmente, el más frecuente es el cemento Portland. Los áridos suelen ser gravas de diferentes características. La mezcla de cemento y arena es el mortero. Por sí solo el hormigón tiene características pétreas y soporta bien los esfuerzos a compresión, pero se fisura cuando se somete a tracción, flexión, torsión y cortante. El hormigón armado dispone de armaduras metálicas que le permiten resistir estos esfuerzos. La Figura A 9 muestra un ejemplo de una estructura de hormigón armado. La Figura A 10 muestra un ejemplo del proceso constructivo de un edificio de hormigón armado con pilares y forjados reticulares. La Figura A 11 muestra un edificio de hormigón armado. Desde que Le Corbusier en los años 20 del siglo pasado propone una nueva arquitectura que permite grandes aberturas, fachadas diáfanas y libertad para la distribución de interiores, el hormigón armado va mejorando su calidad y se va introduciendo progresivamente y de forma masiva en la construcción de edificios. Existe una gran variedad de estructuras de hormigón armado incluyendo edificios singulares como la Torre Califa, conocida también como la Burj Dubai que, con 818 m de altura, es la torre más alta del mundo. Los principales tipos de edificios de hormigón armado y los más frecuentes son: edificios resistentes a momento, edificios resistentes a cortante y edificios duales. Más arriba ya se han definido estos tipos de sistemas estructurales resistentes.



Figura A 9 Ejemplo de edificios de hormigón armado en construcción. Fuente: http://wapedia.mobi/es/Archivo:Estructuras_Edificaci%C3%B3n.JPG. (Última consulta 24 de marzo de 2010).

Otros materiales: estructuras metálicas y de madera

La tecnología actual permite emplear un amplio abanico de nuevos materiales en la construcción, pero, por lo que respecta a elementos estructurales, los más frecuentes son, además de la mampostería y el hormigón armado, el acero y la madera. La madera fue uno de los primeros materiales empleados por el hombre en la construcción de viviendas, pero su uso en vigas y columnas de estructuras portantes fue decreciendo con la progresiva introducción del acero y el hormigón. En Cataluña muchos edificios construidos entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX tienen muros de carga de mampostería de tocho macizo y vigas de madera.



Figura A 10 Ejemplo del proceso constructivo de un edificio de hormigón armado en Cataluña. Se observa, en un primer plano, la preparación de la armadura de un muro de carga. En este caso con la misión de contener suelos. Atrás es posible observar, la preparación de forjados reticulares.

Fuente: los autores.



Figura A 11 Ejemplo de un edificio de hormigón armado de México.

Fuente: http://www.world-housing.net/uploads/101207 115 09.jpg

(Último acceso: 27 de marzo de 2010)

Actualmente hay nuevas tendencias hacia la recuperación de la madera como material estructural. El acero también es conocido como un material desde la antigüedad pero su uso intensivo en estructuras de edificios data hacia finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. En los

edificios con estructura metálica los pilares y las vigas son de hierro o de acero. Los sistemas resistentes en las estructuras metálicas suelen ser pórticos resistentes a momento y pórticos arriostrados. La Figura A 12 muestra un ejemplo de la construcción de un edificio metálico; la Figura A 13 muestra un detalle de una estructura metálica con riostras excéntricas.



Figura A 12 Construcción de un edificio metálico y detalles de la conexión viga-pilar.

Fuente: Bermúdez et al. (2010).



Figura A 13 Ejemplo de un detalle de una estructura metálica con riostras excéntricas

Fuente: http://www.world-housing.net/uploads/100587 026 08.jpg

(Fecha de la última consulta: 21/03/2010).

Los forjados

Los forjados o *techos forjados* son elementos estructurales que reciben las cargas directamente y las distribuyen entre los demás elementos de la estructura hasta la cimentación, los cuales a la vez, transmiten al terreno el peso y las cargas del edificio. Villaba (2006) describe con detalle los diferentes tipos de forjados y los clasifica en unidireccionales, bidireccionales o reticulares y multidireccionales. La Figura A 14 muestra las direcciones de transmisión de fuerzas en los forjados bidireccionales o reticulares (a la izquierda) y en los unidireccionales. A continuación se describen brevemente los tipos de *techos forjados* más frecuentes.

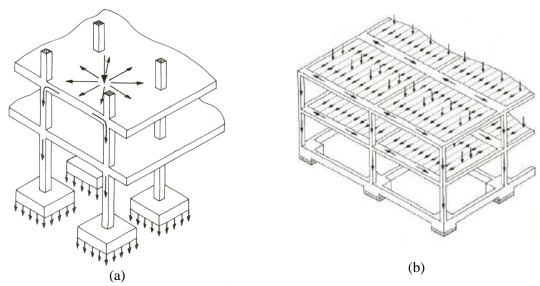


Figura A 14 Diagramas de la transmisión de cargas desde los forjados hasta el terreno. (a) forjados reticulares; (b) forjados unidireccionales.

Fuente: Villalba (2006).

Forjados unidireccionales

Los forjados unidireccionales están formados por vigas paralelas con los espacios entre ellas rellenos con diferentes técnicas (ver Figura A 15 y Figura A 16). Las vigas pueden ser de madera, hierro u hormigón armado prefabricado. Hay diferentes sistemas para cubrir los espacios entre vigas incluyendo bovedillas de ladrillo, casetones y sistemas mixtos.

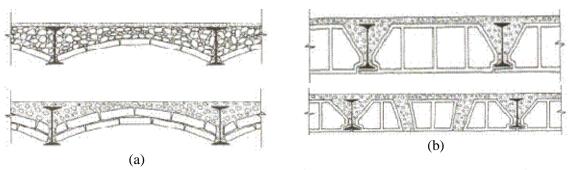


Figura A 15 (a) Techos forjados con vigas metálicas y ladrillos; (b) con vigas metálicas y casetones cerámicos.

Fuente: Villalba (2006).

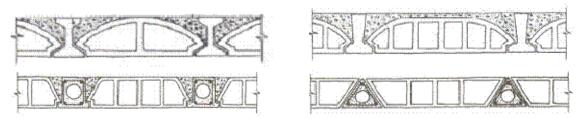
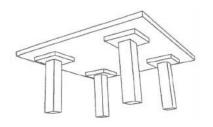


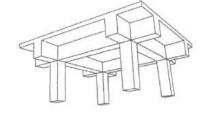
Figura A 16 Soluciones de techos forjados con vigas prefabricadas de hormigón armado y diferentes tipos de casetones cerámicos.

Fuente: Villalba (2006).

Forjados bidireccionales y multidireccionales

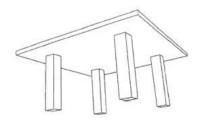
Hay diferentes tipos de *techos forjados* bidireccionales y multidireccionales. La Figura A 17 muestra ejemplos de techos forjados de hormigón armado. Como se observa en la Figura A 14, estos forjados transmiten las cargas a los elementos resistentes en diferentes direcciones. Los forjados reticulares se han hecho populares debido a que proporcionan una gran libertad para la distribución de espacios interiores.

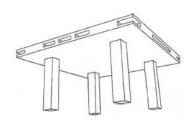




Techo forjado con ábacos y capiteles

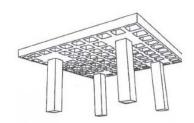
Techo forjado con vigas de canto





Losa maciza de hormigón armado

Losa aligerada de hormigón armado





Techo forjado reticular con ábacos Ejemplo de techo forjado reticular ⁹

Figura A 17 Esquemas y ejemplos de forjados bidireccionales y multidireccionales.

Fuente: Villalba (2006)

Nota: Tanto la losa maciza de hormigón armado como los sistemas de losa aligerada pueden ser bidireccionales o multidireccionales dependiendo de la distribución interna de los elementos aligerantes y de los redondos de la armadura.

Otros detalles estructurales

Hay otros detalles estructurales y arquitectónicos que afectan la vulnerabilidad sísmica de los inmuebles. A partir de daños observados en edificios que han sufrido grandes terremotos se conoce que la regularidad geométrica del edificio, tanto en planta como en altura, así como la distribución simétrica respecto a ejes ortogonales de su masa, rigidez y elementos resistentes contribuyen a mejorar el comportamiento sísmico de las construcciones. Así mismo, se han detectado puntos

Fuente: http://www.construmatica.com/construpedia/Archivo:Sistema-Alucubetas-Alsina.jpg
Última consulta: 27 de marzo de 2010.

singulares de los edificios que tienen un comportamiento perverso en caso de terremoto. El efecto de piso blando y de pilar corto son dos de estos detalles. El piso blando o planta débil es un tipo de irregularidad geométrica en altura y ocurre cuando una planta es más alta y más diáfana que las otras. Este efecto es muy frecuente en nuestras ciudades ya que a menudo las plantas bajas se dedican a servicios relacionados con el comercio y servicios, entre otras. Atendiendo a su función, estas plantas se diseñan de forma que sean más altas y más pocas las paredes divisorias. Este apartado proporciona pautas para detectar y calificar estos detalles.

Irregularidad de la planta.

Los criterios para establecer una clasificación de la irregularidad de la planta se han adaptado del código sísmico europeo (CEN 2004), de la norma sísmica Colombiana (AIS 1998) y de Cardona (1999). La Tabla A 1 muestra las clases de irregularidad en planta según los niveles *Alto*, *Medio* y *Bajo* así como su descripción.

Tabla A 1 Clases de irregularidad en planta, descripción de las clases y pictogramas explicativos

Valor	Descripción de la irregularidad	Gráfico explicativo
	La distribución en planta de los elementos estructurales y/o cargas no es simétrica respecto a ejes ortogonales.	
ALTA	La configuración arquitectónica en planta es asimétrica respecto a ejes ortogonales.	Sistemas no paralelos PLANTA
	Cuando los edificios son muy alargados de forma que la relación entre la dimensión máxima y mínima de la planta es mayor o igual a 4. En la Figura: $L_{max}/L_{max} \geq 4$.	L_{min} $\leftarrow L_{max}$
	La planta del edificio tiene forma de H, T, L o similar y cualquiera de las partes que sobresalen supera el 20% de la dimensión total del edificio.	
Mediana	La irregularidad geométrica es apreciable pero moderada. La dimensión de la parte saliente no excede el 20% de la dimensión total del edificio. En la Figura: $a/b \le 0.2$.	b i a
Ваја	En cualquier otro caso. En estos casos, la distribución de masa a dos ejes ortogonales y, en edificios rectangulares, el cociente mínima de la planta es inferior a 4.	, ,

Irregularidad en altura

La irregularidad en altura está asociada con la variación de masas y rigideces entre las diferentes plantas del edificio. La Tabla A 2 muestra las clases de irregularidad en altura de acuerdo con tres categorías: *Alta, Mediana y baja,* así como su descripción. Los criterios para calificar la irregularidad en altura se han basado en el código sísmico europeo (CEN 2004) y en el trabajo de Cardona (1999).

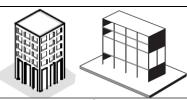
Tabla A 2 Clases de irregularidad en altura, descripción de las clases y pictogramas explicativos.

Clase

Descripción de la irregularidad

Gráficos explicativos

La primera planta, o una planta superior, es más alta en comparación con las demás.



ALTA

El edificio tiene discontinuidades y/o interrupciones de elementos resistentes verticales.

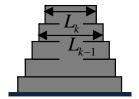


Hay retrocesos consecutivos, con simetría axial, cuyo ancho es igual o superior al 20 % de la longitud de la planta contigua.

En la Figura:
$$L_{k-1} - L_k \ge 0.2L_k$$
 k

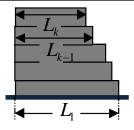
$$k = 2 \cdots N$$

N es el número de plantas del edificio.



Hay retrocesos que no preservan la simetría axial de forma que:

- a) La reducción del ancho de la planta es mayor o igual que el 10% del ancho de la planta contigua
- b) La suma de todos los retrocesos es mayor o igual que el 30% del ancho de la primera.



MEDIANA

En una altura inferior al 15% de la altura del edificio, existen retrocesos con simetría axial, cuyo ancho es mayor o igual que el 20% del ancho de la planta contigua. En la Figura:

 $L_1 + L_2 \ge 0.2 L$

En una altura superior al 15% de la altura del edificio, existen retrocesos con simetría axial, cuyo ancho es igual o mayor que el 50% del ancho de la planta contigua. En la Figura: $L_1 + L_2 \geq 0.5 \, L$

Baja

Todos los sistemas resistentes a cargas se distribuyen sin interrupciones desde la cimentación hasta la altura total del edificio. Tanto la rigidez lateral como las masas de de cada nivel deben mantenerse constantes sin presentarse cambios abruptos entre plantas contiguas

Pilar corto

El efecto de *pilar*¹⁰*corto* o *columna*¹¹*corta* es bien conocido en el mundo de la ingeniería sísmica dado que es causa de daños relevantes en edificios sometidos a terremotos. Hablamos de este efecto cuando el pilar ha quedado parcialmente confinado a consecuencia de, por ejemplo, reformas para aprovechar techos altos para crear altillos transitables (*entresolats*)¹² o tabiques de altura limitada levantados para soportar ventanales o ventanas elevadas que, eventualmente, pueden llegar hasta a ras de techo. También se pueden producir pilares cortos como consecuencia de suelos inclinados. La Figura A 18muestra ejemplos de situaciones que pueden dar lugar a *pilares cortos*.

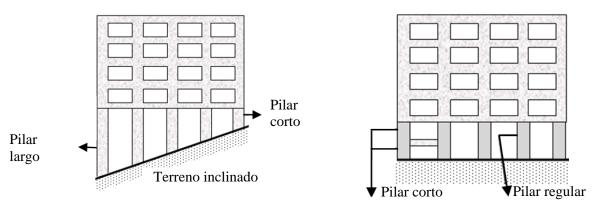


Figura A 18 Ejemplos de situaciones que pueden producir pilares cortos y pilares largos. *Fuente: Rojas (2005)*

En terremotos destructivos se observa cómo estos pilares cortos tienen la capacidad de concentrar mayores esfuerzos y son causa de daños mayores. Hay bastante literatura en donde se describen, de forma cualitativa, estos efectos pero no son frecuentes estudios cuantitativos que permiten decidir cuál es la altura de confinamiento a partir de la cual se presenta. Rojas (2005) dedica su tesis de máster al análisis cuantitativo. De acuerdo con este estudio, se considera que este efecto comienza a ser importante cuando la altura del pilar corto es inferior al 60% de la altura del pilar regular (ver la Figura A 18) y es muy relevante cuando la altura del pilar es inferior al 30%, es decir, cuando la parte cautiva del pilar es superior al 70% de su altura total. Este efecto es frecuente en muchos edificios escolares en todo el mundo. La Figura A 19 muestra un ejemplo de cómo se forma este mecanismo en un caso de ventanas elevadas.

Los periodos constructivos

Identificar el año o el periodo de construcción tiene un doble propósito. Por un lado, permite hacer hipótesis sobre la tecnología constructiva de la época y, en caso de no disponer información específica sobre el tipo de edificio, suponer que pertenece a la más frecuente en el periodo en el cual fue edificada. Por otro lado, los periodos constructivos se han establecido de acuerdo con la aparición progresiva de normativas de edificación y normativas sísmicas en España. Así, es posible también hacer hipótesis sobre el nivel de protección del edificio a cargas laterales y, en particular, a cargas sísmicas. La Tabla A 3 muestra los diferentes periodos constructivos considerados y la distribución de los edificios de Barcelona en estos periodos. El proyecto Risk-UE (Lungu et al.

Pilar: soporte vertical, considerablemente más alto que ancho; puede estar hecho de piedra, ladrillos, hormigón, hierro.

Columna: pilar de piedra u otro material, ordinariamente de sección circular, formado por una base, un fuste y un capitel, que sirven de soporte para techos, de ornamento y a veces de monumento.

Entresolat: parte superior de un cuarto dividido, parcial o totalmente, a través de un techo construido a una cierta altura.

2003) considera cuatro subclases de edificios, de acuerdo con sus propiedades específicamente sismo resistentes. Estos dependen de los códigos sísmicos existentes en la época en que se construyó el edificio y del nivel de obligatoriedad de su uso. Las cuatro subclases consideradas son: *N: sin código, L: código de bajo nivel, M: código de nivel medio y H:código de nivel alto*, comparable al Eurocódigo (CEN 2004). En la Tabla A 4 se presentan los códigos de las tipologías constructivas

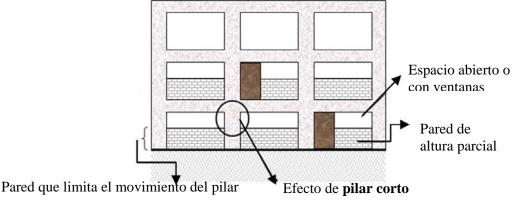


Figura A 19 Ilustración de formación de un mecanismo típico de pilar corto.

Fuente: Rojas, 2005

Nota: Esta configuración de paredes de altura limitada y ventanas altas es muy frecuente en las escuelas de todo el mundo

Tabla A 3 Periodos constructivos basados en las normativas de edificación y las normativas sísmicas españolas

	Período	Intervalo del período constructivo	Normativa Española que define el período	Obligatoriedad en Barcelona	Práctica constructiva con reforzamientos laterales	Nivel de diseño sísmico	Edificios (%)
	I	<=1940			Ausente	No	43
	II	1941-1962			Deficiente	No	20
	III	1963-1968	Norma MV-101-1962	No especifica	Deficiente	No	10
	IV	1969-1974	Normativa sísmica PGS-1 (1968)	Sí	Aceptable	Bajo	9
	V	1975-1994	Normativa sísmica PDS (1974)	Sí	Aceptable	Bajo	13
		1995-2002	Normativa sísmica NCSE-94 (1995)	No	Aceptable	Bajo	
VI	VI	2003-2007	Normativas sísmicas NCSE-02 (2002) EC 08 (CEN 2004)	Sí	Aceptable	Bajo - Medio	5

Fuente: Lantada et al. (2009), sobre datos cedidos por el Ayuntamiento de Barcelona. Nota: En la Tabla A-3 También se detalla la obligatoriedad de las normas sismoresistentes en Barcelona y la distribución de los edificios de la ciudad

Otras recomendaciones para rellenar el Formulario 2

- Antes de rellenar el formulario es conveniente disponer de información previa sobre las principales características del edificio y, en la medida de lo posible, poder tener acceso a planos estructurales del edificio o edificio que lo componen.
- Una identificación precisa del sistema estructural puede requerir acceder a dependencias específicas en las cuales se prevea que se pueda tener acceso directo a los elementos estructurales y poder identificar, sin ambigüedades, los materiales constructivos y el sistema resistente a cargas. A menudo, cuando el sistema resistente es de pórticos, la estructura de vigas y pilares y los materiales de hormigón o acero quedan visibles en los sótanos y cuartos o almacenes de servicios como, por ejemplo, cuartos con máquinas o con transformadores y distribuidores del sistema eléctrico.
- Una observación directa de los forjados normalmente requiere remover los falsos techos. En el caso que pueda haber materiales de acero, como por ejemplo vigas metálicas, hace falta prever que pueden estar recubiertas por otros materiales que los protegen, por ejemplo, contra incendios.
- La presencia de muros de carga y elementos de arriostramiento puede ser difícil de detectar. Para confirmar o descartar su existencia conviene examinar lugares sin acabados como por ejemplo, núcleos de ascensores, escaleras de servicio y, a veces, también puede ayudar observar fachadas secundarias de patios internos o fachadas que dan a edificios colindantes.
- Cuando sea posible, puede ser muy conveniente delegar la tarea de rellenar el formulario a una persona con conocimientos del edificio e involucrar a aquellos servicios, que por su misión, pueden tener un conocimiento privilegiado de los aspectos relevantes y de los detalles constructivos del edificio. La mayoría de las instituciones y grandes edificios tienen un servicio de obras y mantenimiento.

En cualquier caso, acabamos recordando que está previsto que haya una persona experta y con conocimientos técnicos para ayudar en la tarea de la identificación de la tipología estructural y otros detalles constructivos del edificio. La persona de contacto ha de facilitar la coordinación entre el personal técnico y el experto externo.

	Tabla	a A 4 Matri	z de edificios adoptada	en el proye	cto Risk-UE			
Tipos de			_	Clases de altura				
material	No.	Código	Descripción	Nombre	Número de pisos	Intervalo de altura (m)		
	1	M11L	Muros de carga con mampostería de piedras y	Baja	1 – 2	≤ 6		
	2	M11M	piedra machacada	Media	3 – 5	6 – 15		
Mananatania	3	M12L	Muros de carga con	Baja	1 – 2	≤ 6		
Mampostería - o piedra -	4	M12M	mampostería de piedra	Media	3 – 5	6 – 15		
o piedia	5	M12H	tallada	Alta	6+	> 15		
_	6	M13L	Muros de carga de	Baja	1 – 2	≤6		
_	7	M13M	mampostería de sillería -	Media	3 – 5	6 – 15		
	8	M13H	mampostoria de emeria	Alta	6+	> 15		
Adobe	9	M2L	Muros construidos con mampostería de adobe	Baja	1 – 2	≤6		
	10	M31L		Baja	1 – 2	≤6		
•	11	M31M	Forjados de madera	Media	3 – 5	6 – 15		
-	12	M31H	-	Alta	6+	> 15		
	13	M32L	Cariadas da hávadas da	Baja	1 – 2	≤ 6		
Mampostería	14	M32M	Forjados de bóvedas de - mampostería -	Media	3 – 5	6 – 15		
no reforzada de ladrillo	15	M32H	- mamposteria -	Alta	6+	> 15		
cocido	16	M33L	Foriados compuestos do	Baja	1 – 2	≤6		
000100	17	M33M	Forjados compuestos de - acero y mampostería -	Media	3 – 5	6 – 15		
	18	МЗЗН	acero y mamposteria	Alta	6+	> 15		
	19	M34L		Baja	1 – 2	≤ 6		
	20	M34M	Forjados de hormigón	Media	3 – 5	6 – 15		
-	21	M34H	-	Alta	6+	> 15		
Mampostería	22	M4L	Muros de carga de	Baja	1 – 2	≤6		
reforzada o	23	M4M	mampostería armada o	Media	3 – 5	6 – 15		
confinada	24	M4H	confinada	Alta	6+	> 15		
Mampostería -	25	M5L	Edificio de mampostería	Baja	1 – 2	≤ 6		
rehabilitada	26	M5M	totalmente rehabilitado -	Media	3 – 5	6 – 15		
101100111000	27	M5H	totalinonto ronabilitado	Alta	6+	> 15		
-	28	RC1L	Estructuras resistentes al	Baja	1 – 2	≤6		
-	29	RC1M	- momento -	Media	3 – 5	6 – 15		
-	30	RC1H		Alta	6+	> 15		
-	31	RC2L	Muros de cortante de	Baja	1 – 2	≤ 6		
	32	RC2M	hormigón armado -	Media	3 – 5	6 – 15		
-	32	RC2H		Alta	6+	> 15		
-	34	RC31L	Estructuras regulares con	Baja	1 – 2	≤6		
-	35	RC31M	tabiquería de mampostería	Media	3 – 5	6 – 15		
-	36	RC31H	no reforzada	Alta	6+	> 15		
Harminán -	37	RC32L	Estructuras irregulares con	Baja	1 – 2	≤ 6		
Hormigón armado	38	RC32M	tabiquería de mampostería	Media	3 – 5	6 – 15		
annado	39	RC32H	no reforzada (*)	Alta	6+	> 15		
-	40	RC4L	Sistemas duales: pórticos y	Baja	1-2	≤6		
-	41	RC4M	muros a cortante.	Media	3 – 5	6 – 15		
-	42	RC4H		Alta	6+	> 15		
-	43	RC5L	Muros de hormigón -	Baja	1-2	≤6		
-	44	RC5M	prefabricado –	Media	3 – 5	6 – 15		
-	45	RC5H	·	Alta	6+	> 15		
-	46	RC6L	Estructuras de hormigón prefabricado con muros de	Baja	1-2	≤ 6 6 15		
-	47	RC6M	cortante de hormigón	Media	3 – 5	6 – 15		
Fater atoms	48	RC6H	armado	Alta	6+	> 15		
Estructuras	49	S1L	Estructuras metálicas	Baja	1 – 2	≤6		

					Clases de altura	<u> </u>
Tipos de material	No.	Código	Descripción	Nombre	Número de pisos	Intervalo de altura (m)
metálicas	50	S1M	resistentes a momento	Media	3 – 5	6 – 15
	51	S1H		Alta	6+	> 15
	52	S2L	Catrusturas metálicas	Baja	1 – 2	≤ 6
	53	S2M	Estructuras metálicas = arriostrados =	Media	3 – 5	6 – 15
	54	S2H	41103114403	Alta	6+	> 15
	55	S3L	Estructuras metálicas con	Baja	1 – 2	≤ 6
	56	S3M	tabiquería de mampostería	Media	3 – 5	6 – 15
	57	S3H	no reforzada	Alta	6+	> 15
	58	S4L	Estructuras metálicas con	Baja	1 – 2	≤ 6
	59	S4M	muros de cortante de	Media	3 – 5	6 – 15
	60	S4H	hormigón colocados in situ	Alta	6+	> 15
Sistemas	61	S5L	Sistemas o estructuras	Baja	1 – 2	≤ 6
compuestos	62	S5M	mixtas de acero y	Media	3 – 5	6 – 15
Compacsios	63	S5H	hormigón armado	Alta	6+	> 15
Madera	64	WL	Estructuras de madera -	Baja	1 – 2	≤ 6
iviauera	65	WM	Estructuras de madera =	Media	3 – 5	6 – 15

Fuente: Lungu et al. (2003).

^(*) Dentro de esta categoría de edificios, RC32, se incluyen muchos edificios típicos de Cataluña, cuya estructura está hecha de pilares y forjados de hormigón armado que suelen ser aligerados y pueden ser unidireccionales o bidireccionales. También se suele hablar de forjados reticulares cuando se habla de este tipo de forjados. Algunas veces estos edificios se modelan como edificios de pórticos de hormigón resistentes a momento con pilares y vigas equivalentes y se refieren como RC1. Hace falta llamar la atención para no confundir estas dos tipologías constructivas.

Referencias

- AIS (1998) "Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR 98" (Ley 400 de 1997 y decreto 33 de 1998) Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS. Bogotá, Colombia
- Barbat A. H., Oller S. y J.C Vielma (2007) "Confinamiento y ductilidad de los edificios de hormigón armado". *Serie de monografías ARCER*, monografía Nº 5, Madrid.
- Bermúdez C.A. (2010). "Evaluación sísmica de los edificios de acero". Aplicación a edificios típicos de Manizales diseñados y construidos de acuerdo a la NSR-98. Tesis doctoral. UPC. (En preparación).
- Bermúdez C.A., Hurtado J.E. Pujades L. G., Barbat A.H and J.R. González-Drigo. "Probabilistic assessment of the seismic performance of steel buildings designed according to the LRFD specification". *New trends in seismic design of structures*. Nikos D. Lagaros, Yiannis Tsompanakis & Manolis Papadrakakis
- Cardona O.D (1999) "Vulnerabilidad sísmica de hospitales Fundamentos para ingenieros y arquitectos". *Monografías de Ingeniería Sísmica*. CIMNE IS -32. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona.
- CEN (2004) EN-1998-1 (2004) "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance". Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Comité Européen de Normalisation, Brussels. 229 pp.
- FEMA (2002) "Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards A Handbook". Second edition. FEMA/ATC 154. Federal Emergency Management Agency and Applied Technology Council. Washington, D.C.
- GenCat (2001) "Diccionari Visual de la Construcció". Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. [En línea]. Disponible en: http://www10.gencat.cat/ptop/AppJava/cat/documentacio/llengua/terminologia/diccvisual.jsp.

 [Última consulta 17 /03/2010]
- Lantada, N. (2007) "Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Lantada, N., Pujades L.G. y A.H. Barbat (2009) "Escenarios de riesgo sísmico para la ciudad de Barcelona". Informe técnico elaborado para el Ayuntamiento de Barcelona. Servicios de Protección Civil del Ayuntamiento de Barcelona. Vol. I informe ejecutivo 54 pp. Vol II. Informe Técnico, 84 pp. Vol III Anexos al Informe técnico, 67 pp.
- Lungu D., Aldea A., Arion A., Vacareanu R., Petrescu F., Cornea T. (2003) "WP1: European distinctive features, inventory database and typology". Risk-UE project Handbook. September 2003. Risk-UE project report. 58 pp.
- Milutinovic Z. V. and G. S. Trendafiloski (2003) WP4: Vulnerability of current buildings. Risk-UE project Handbook. September 2003. Risk-UE project report. 111 pp.
- MV101 (1963) "Norma N.V.101-1962. Acciones en la edificación". Ministerio de la Vivienda, decreto del 17 de enero de 1963 (195/1963) 27 pp.
- NCSE-02 (2002). "Norma de Construcción Sismorresistente Española". Parte General y de Edificación, Comisión Permanente de Normas Sismorresistente, Real Decreto 997/2002 del 27 de septiembre de 2002, Boletín Oficial del Estado nº 244, viernes 11 de octubre de 2002. Ministerio de Fomento. 35898-35987 pp.

- NCSE-94 (1994) "Norma de Construcción Sismorresistente Española". Parte General y de Edificación. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, Real Decreto 2543/1994 del 29 de diciembre de 1994, Boletín Oficial del Estado nº 33, miércoles 8 de febrero de 1995. 3936-3980 pp.
- PDS-1 (1974) "Norma Sismorresistente P.D.S.-1". Comisión Interministerial de la Presidencia del Gobierno, Decreto de 30 de agosto de 1974, BOE, 279, 21 de noviembre de 1974. 3723-3740 pp.
- PGS-1 (1968) "Decreto 106/1968, de 16 de enero, por el que se aprueba la aplicación de la «Norma Sismorresistente PGS 1 (1968), parte A»". Presidencia del Gobierno. BOE 30/1968. Fecha de publicación. 04/02/1968. 1658 pp
- Rojas N.J. (2005) "Consideración de las columnas cortas en la vulnerabilidad sísmica de las estructuras". Tesis Msc. 126 p. Universidad de Puerto Rico. [En línea]. Disponible en: http://grad.uprm.edu/tesis/rojasmercedes.pdf. [Última consulta 24/03/2010]
- Villalba V (2006) "Introducción a los forjados". [En línea]. Disponible en: http://assig-camins.upc.es/camins/edificacio/tra_INTRODUCCION A LOS FORJADOS.pdf. Puede también acceder a otros temas en: http://assig-camins.upc.es/camins/edificacio/. [Última consulta: 22/03/2010].

Anexo B: Parámetros de los espectros de capacidad y curvas de fragilidad de las tipologías estructurales

En la Tabla B. 1 se presentan, para cada tipología considerada en el estudio, los parámetros del espectro de capacidad en formato bilineal, correspondientes al desplazamiento y aceleraciones espectrales para los puntos de cedencia (Sdy,Say) y resistencia última (Sdu, Sau). Así mismo, se presentan los valores medios (Sd) y las desviaciones típicas (β) de las curvas de fragilidad asociadas a los estados de daño leve, moderado, extensivo y completo.

Tabla B. 1 Parámetros de los espectros de capacidad y curvas de fragilidad de las tipologías estructurales

		Parámetros de las curvas de fragilidad Parámetros de las curvas de fragilidad Parámetros de las curvas de fragilidad												
Tipología	Cedencia		1	Capacidad última		Valores r	nedios (\overline{Sd}))		Desviaciones típicas (β)			Fuente	Notas
	Sdy (cm)	Say (g)	Sdu (cm)	Sau (g)	Leve (cm)	Moderado (cm)	Extensivo (cm)	Completo (cm)	Leve	Moderado	Extensivo	Completo	•	
M11L	0.38	0.173	1.93	0.17	0.27	0.38	0.77	1.93	0.173	0.65	0.58	0.463		
M11M	0.47	0.115	2.03	0.12	0.33	0.47	0.86	2.03	0.177	0.65	0.53	0.433		Università degli Studi di
M11H	0.66	0.058	2.28	0.06	0.46	0.66	1.07	2.28	0.18	0.32	0.45	0.38	RISK-UE	Genova (UNIGE).
M12L	0.15	0.15	1.55	0.15	0.11	0.15	0.50	1.55	0.155	0.65	0.85	0.568	Milutinovic & Trendafiloski (2003)	Edificios sin diseño sismo resistente
M12M	0.31	0.12	1.69	0.13	0.22	0.31	0.66	1.69	0.173	0.65	0.61	0.473	,	(Pre code)
M12H	0.48	0.1	1.85	0.12	0.34	0.48	0.82	1.85	0.173	0.36	0.49	0.41		
M13L	0.26	0.355	1.7	0.36	0.18	0.26	0.62	1.70	0.185	0.65	0.68	0.508		Corresponde a la tipología M4L
M13M	0.35	0.165	3.03	0.17	0.25	0.35	1.02	3.03	0.168	0.65	0.78	0.548		Corresponde a la tipología M4M
M13H	0.48	0.124	3.17	0.12	0.34	0.48	1.15	3.17	0.173	0.65	0.68	0.51		Corresponde a la tipología M4H
M2	0.17	0.096	1.15	0.1	0.12	0.17	0.42	1.15	0.175	0.65	0.69	0.505		Corresponde a la tipología M2
M31LLC	0.3	0.406	1.32	0.41	0.21	0.30	0.56	1.32	0.18	0.65	0.53	0.43	Giovinazzi (2005)	Corresponde a la tipología M5.w-L
M31MLC	0.5	0.239	1.53	0.24	0.35	0.50	0.76	1.53	0.18	0.29	0.41	0.353	GIOVIIIuZZI (2003)	Corresponde a la tipología M5.w-M
M31HLC	0.69	0.181	1.73	0.18	0.48	0.69	0.95	1.73	0.18	0.29	0.41	0.353		Corresponde a la tipología M5.w-H
M32LLC	0.39	0.26	1.48	0.26	0.27	0.39	0.66	1.48	0.18	0.35	0.48	0.405		Corresponde a la tipología M5.v-L
M32MLC	0.69	0.16	1.78	0.16	0.48	0.69	0.96	1.78	0.18	0.35	0.65	0.405		Corresponde a la tipología M5.v-M
M32HLC	0.99	0.12	2.08	0.12	0.69	0.99	1.26	2.08	0.18	0.35	0.65	0.405		Corresponde a la tipología M5.v-H

Anexo B: Parámetros de los espectros de capacidad y curvas de fragilidad de las tipologías estructurales

			del espect d (bilinea	1)			Pará							
Tipología	Cedencia Capacidad última			Valores medios (\overline{Sd})					Desviacione	es típicas (β)		Fuente	Notas	
	Sdy (cm)	Say (g)	Sdu (cm)	Sau (g)	Leve (cm)	Moderado (cm)	Extensivo (cm)	Completo (cm)	Leve	Moderado	Extensivo	Completo	-	
M33LLC	0.27	0.65	1.36	0.56	0.19	0.27	0.54	1.36	0.28	0.37	0.54	0.72	D (2002)	
M33MLC	0.63	0.13	2.91	0.12	0.44	0.63	1.20	2.91	0.4	0.5	0.75	0.7	Bonet (2003)	
M33HLC	0.68	0.10	2.61	0.08	0.48	0.68	1.16	2.61	0.3	0.65	0.65	0.65	RISK-UE Milutinovic & Trendafiloski (2003)	Centro Internacional de Métodos Númericos en Ingeniería - CIMNE
M34LLC	0.53	0.30	3.18	0.30	0.37	0.53	1.19	3.18	0.28	0.34	0.73	0.76	RISK UE Milutinovic & Trendafiloski (2003)	UNIGE - edificios sin diseño sismo resistente (pre code)
M34MLC	0.75	0.15	3.47	0.15	0.53	0.75	1.43	3.47	0.28	0.38	0.62	0.69	RISKUE- Milutinovic &	CIMNE edificios sin diseño sismo resistente
M34HLC	0.92	0.10	3.67	0.10	0.64	0.92	1.61	3.67	0.28	0.37	0.55	0.64	Trendafiloski (2003)	(pre code)
M4MLC	0.15	0.10	0.54	0.18	0.11	0.15	0.25	0.54	0.16	0.38	0.46	0.39	Ruiz-García (2010)	
RC1LLC	2.32	0.19	9.58	0.21	1.62	2.32	4.14	9.58	0.18	0.41	0.51	0.42		
RC1MLC	4.27	0.17	10.77	0.18	2.99	4.27	5.90	10.77	0.18	0.41	0.65	0.42		
RC1HLC	5.76	0.12	14.83	0.14	4.03	5.76	8.03	14.83	0.18	0.41	0.65	0.42		A rigtotle University of
RC2LLC	1.08	0.39	5.05	0.47	0.76	1.08	2.07	5.05	0.18	0.65	0.65	0.45	RISKUE-Milutinovic	Aristotle University of Thessaloniki AUTH. Edificios de bajo diseño sismo resistente (Low code)
RC2MLC	1.46	0.18	8.25	0.25	1.02	1.46	3.16	8.25	0.18	0.65	0.65	0.48	& Trendafiloski	
RC2HLC	3.86	0.20	15.60	0.26	2.70	3.86	6.80	15.60	0.18	0.65	0.65	0.48	(2003)	
RC31LLC	0.44	1.54	1.87	2.23	0.31	0.44	0.80	1.87	0.28	0.38	0.58	0.66		(Low code)
RC31MLC	0.85	0.81	2.63	1.13	0.60	0.85	1.30	2.63	0.28	0.34	0.44	0.54		
RC31HLC	2.14	0.46	5.98	0.63	1.50	2.14	3.10	5.98	0.28	0.32	0.4	0.5		
RC32LLC	0.70	0.13	5.24	0.14	0.49	0.70	1.84	5.24	0.28	0.37	0.82	0.83		
RC32MLC	1.42	0.08	5.11	0.12	0.99	1.42	2.34	5.11	0.28	0.36	0.5	0.61	Moreno (2006)	
RC32HLC	1.89	0.06	4.68	0.08	1.32	1.89	2.59	4.68	0.28	0.29	0.34	0.45		
RC4LLC	0.32	0.58	2.48	0.88	0.22	0.32	0.86	2.48	0.18	0.65	0.74	0.533	RISKUE-	AUTH Edificios de bajo
RC4MLC	0.82	0.33	4.87	0.45	0.57	0.82	1.83	4.87	0.18	0.65	0.74	0.533	(Milutinovic &	diseño sismo resistente
RC4HLC	2.81	0.36	9.88	0.41	1.97	2.81	4.58	9.88	0.18	0.65	0.65	0.53	Trendafiloski (2003)	(Low code)
S1LLCHZ	0.38	0.06	5.59	0.19	3.302	5.2578	11.125	27.54	0.671	0.68	0.68	0.891	Hazus (FEMA/NIBS	Corresponde a la tipología
S1MLCHZ	1.12	0.04	11.28	0.12	5.334	8.7376	18.542	45.72	0.547	0.68	0.77	0.912	2003) - Low Code	S1

Anexo B: Parámetros de los espectros de capacidad y curvas de fragilidad de las tipologías estructurales

			lel espect d (bilinea				Pará							
Tipología	Cedencia		Capacidad última		Valores medios (\overline{Sd})					Desviacione	es típicas (β)		Fuente	Notas
	Sdy (cm)	Say (g)	Sdu (cm)	Sau (g)	Leve (cm)	Moderado (cm)	Extensivo (cm)	Completo (cm)	Leve	Moderado	Extensivo	Completo	•	
S4LLCHZ	0.25	0.08	2.74	0.18	2.1844	3.5052	8.8138	24.003	0.981	0.91	0.82	0.912		Corresponde a la tipología S4
S4MLCHZ	0.69	0.07	5.21	0.15	3.6576	5.8674	14.681	40.005	0.658	0.68	0.83	0.922	Hazus FEMA/NIBS	Corresponde a la tipología S4
S3LLCHZ	0.30	0.10	3.05	0.20	1.651	3.302	8.2296	19.202	1.027	0.97	0.92	0.881	2003) - Low Code	
S3MLCHZ	0.86	0.08	5.77	0.17	2.7432	5.4864	13.716	32.004	0.671	0.7	0.79	0.912		Corresponde a la tipología S5
S3HLCHZ	2.77	0.06	13.84	0.13	4.2672	8.5598	21.387	49.936	0.575	0.62	0.82	0.902		53
RC6LB	5.00	0.067	8.67	0.067	3.50	5.00	5.92	8.67	0.178	0.2	0.2	0.191	Biondini et al. (2008)	
RC6MB	11.33	0.067	18.00	0.067	7.93	11.33	13.00	18.00	0.178	0.2	0.2	0.165	y Biondini et al. (2010)	
RC5LB	1.33	0.067	6.67	0.067	0.93	1.33	2.67	6.67	0.18	0.2	0.2	0.46	Wilson et al. (2008)	
W1LCHZ	0.6096	0.2	10.973	0.6	1.27	3.175	9.8044	24.003	0.86	0.91	0.95	0.922	Hazus - Low Code	Corresponde a la tipología W1

Referencias

- Biondini, F., Toniolo, G., Tsionis, G. (2008) "Seismic design criteria for multi-storey precast structures". *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Biondini, F., Toniolo, G., Tsionis, G. (2010) "Capacity Design and Seismic Performance of multy storey precast structures". European Journal of Environmental and Civil Engineering, 14(1), 11-28
- Bonett, R. (2003) "Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- FEMA/NIBS (2003) "Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model HAZUS®MH MR4" Technical Manual. Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response Directorate, Mitigation Division and National Institute of Building Sciences Washington, D.C. [En línea]. Disponible en: http://www.fema.gov/protecting-our-communities/hazus [Última consulta 25/09/2012]
- Giovanazzi, S (2005) "The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis". Department of Civil Engineering of the Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig. Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence. Tesis doctoral. 222pp

- Milutinovic ZV, Trendafiloski GS (2003), "WP4: Vulnerability of current buildings". Risk-UE project Handbook. Sep. 2003. Risk-UE project report.111 pp
- Moreno, R. (2006) "Análisis no lineal estático y dinámico para la evaluación del riesgo sísmico en edificios. Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. [En línea]. Disponible en: http://www.tdx.cat/TDX-0702107-165654 [última consulta 25/09/2012]
- Ruiz-García, J. Terán-Gilmore, A., Zuñiga-Cuevas, O. (2010) "Simplified drift-based fragility assessment of confined masonry buildings". Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Compte Rendu de la 9ième Conférence Nationale Américaine et 10ième Conférence Canadienne de Génie Parasismique. July 25-29, 2010, Toronto, Ontario, Canada. Paper No 1240