



Por una cultura común del riesgo sísmico
Pour une culture commune du risque sismique

«Informe sobre la herramienta web para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios esenciales (ASSEE)»

Reporte - Acción 4



Autores: Janira Irizarry¹, Jose Antonio Jara¹, Ana María Zapata¹

Palabras clave: Seguridad sísmica, daño, esencial, comportamiento, terremoto, riesgo

-
1. ICGC : Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
 2. BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
 3. UPC : Universitat Politècnica de Catalunya
 4. DIGC : Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
 5. IEA : Institut d'Estudis Andorrans
 6. ENIT : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
 7. CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique - Délégation Alsace
 8. EPLFM : Entente pour la Forêt Méditerranéenne
 9. DW : Deveryware
 10. ACE : Associació de Consultors d'Estructures

© «Noviembre 2021», proyecto POCRISC

Resumen

Como parte del proyecto POCRISC, el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) ha desarrollado una primera versión de la herramienta web ASSEE para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios de especial importancia. Su objetivo principal es contribuir al análisis del riesgo sísmico a escala municipal al proporcionar a los técnicos municipales una herramienta que les ayude a identificar fácilmente los edificios con mayor riesgo sísmico teniendo en cuenta la peligrosidad sísmica local de la región. La herramienta web, ASSEE, integra la metodología propuesta por Valcárcel (2013) para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios de especial importancia que evalúa si un edificio cumple con los niveles de comportamiento sísmico requeridos.

En ASSEE, la acción sísmica se define por los resultados de la evaluación probabilística de la peligrosidad sísmica para la región y los efectos de suelo del emplazamiento se incluyen a partir de los resultados de una mesozonación sísmica de Cataluña. Los daños esperados se obtienen aplicando una metodología simplificada basada en el método del espectro de capacidad y las tipologías estructurales identificadas por el usuario. La herramienta web realiza el método del espectro de capacidad y calcula la distribución de daños esperados para periodos de retorno de 475 y 975 años. Finalmente, se evalúa la seguridad de los edificios de especial importancia para ambos periodos de retorno como se sugiere en Valcárcel (2013).

La evaluación de la seguridad sísmica de ASSEE permite identificar los edificios de especial importancia con mayor riesgo que no se comportan satisfactoriamente. Esta evaluación representa un primer paso hacia una evaluación más detallada del comportamiento de estos edificios que puede conducir a la aplicación de políticas de reducción de la vulnerabilidad para asegurar que se cumpla el comportamiento sísmico deseado.

Este informe hace referencia a la primera versión de la herramienta, que permite su aplicación expedita a la región de Cataluña. Desarrollos futuros han de permitir ampliar los ámbitos de aplicación.

Con esta versión se han realizado pruebas con la metodología y el funcionamiento de la herramienta ASSEE que han dejado claras las ventajas de tener una aplicación que facilite su implementación y han permitido identificar mejoras a implementar en versiones posteriores, tanto en funcionamiento de la herramienta como en ciertos parámetros propios de la metodología. El propósito es que la herramienta pueda ponerse a disposición de los técnicos municipales a los cuales va dirigida para facilitar la caracterización del riesgo sísmico de los edificios esenciales y de especial importancia.

Indice

1	Introducción.....	9
1.1	Objetivos.....	9
2	Metodología para evaluar la seguridad sísmica.....	11
2.1	Seguridad Sísmica.....	12
2.2	Método del espectro de capacidad.....	13
2.3	Tipología estructural.....	15
2.4	Curvas de fragilidad.....	15
2.5	Matrices de probabilidad de daño y del grado de daño medio.....	18
2.6	Verificación de los niveles de comportamiento.....	18
2.7	Índice de pérdida económica.....	19
2.8	Índice de funcionalidad y tiempo de recuperación.....	20
2.9	Alcance de la metodología y sus resultados.....	21
2.9.1	Uso de los resultados.....	22
2.9.2	Simplificaciones en la descripción de los edificios.....	22
2.9.3	Vulnerabilidad y daño.....	22
2.9.4	Índice de funcionalidad, índice de pérdida económica y tiempo de recuperación	22
3	Evaluación de la demanda sísmica.....	23
3.1	Peligrosidad sísmica.....	23
3.2	Efectos de suelo.....	23
4.	Herramienta web ASSEE.....	27
4.1	Arquitectura del sistema.....	27
4.2	Datos de Entrada.....	27
4.3	Resultados del programa.....	28
4.4	Interfaz de administrador.....	33
5	Ejemplo de aplicación.....	34
5.1	Edificio del Instituto Santa Eugenia.....	34
5.2	Datos de entrada.....	36
5.3	Análisis de la seguridad sísmica del edificio.....	36
6	Mejoras por implementar.....	41
6.1	Aspectos por mejorar de la metodología implementada.....	41
6.2	Problemas con el desarrollo de la herramienta.....	42
7	Conclusiones.....	43

Lista de figuras

Figura 1. Delimitación de la zona de estudio del mapa ShakeMap de POCRISC (línea en naranja), su zona de influencia (línea en verde) y las provincias que abarca. .	10
Figura 2. Esquema del proceso de la metodología para la evaluación de la seguridad propuesta por Valcárcel (2013).	11
Figura 3. Requisitos basados en el comportamiento sísmico según el Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995).	12
Figura 4. Esquema gráfico del método del espectro de capacidad.	14
Figura 5. Cálculo del punto de capacidad por demanda y del espectro de demanda (Valcárcel, 2013).	14
Figura 6. Ejemplo de curvas de fragilidad utilizadas para obtener las probabilidades de los estados de daño.	17
Figura 7. Funciones de pertenencia adoptadas por Valcárcel (2013) para la evaluación del índice de pérdida económica.	20
Figura 8. Índice de funcionalidad y tiempo de recuperación según el grado de daño medio normalizado.	21
Figura 9. Comparación entre los mapas de PGA para un período de retorno de 475 años de (a) el estudio PSHA de IGC y GEOTER (2008) y (b) la nueva evaluación PSHA para España de Martínez Solares et al. (2017).	24
Figura 10. Mapa de mesozonación sísmica de Cataluña (MSC), escala 1: 100M.	24
Figura 11. Diversas configuraciones para las 6 clases de suelo identificadas en el estudio de mesozonación sísmica de Cataluña.	26
Figura 12. Espectros de respuesta de aceleración normalizados para cada clase de suelo de mesozonación (Colas et al., 2012).	26
Figura 13. Ejemplo de una página de entrada de ASSEE.	28
Figura 14. Ejemplo de la exportación de resultados para el período de retorno de 975 años. ..	29
Figura 15. Ejemplo de la exportación del resumen comparativo y evaluación de seguridad.	30
Figura 16. Ejemplo de resultados de daños esperados para un período de retorno de 975 años.	31
Figura 17. Ejemplo de comparación de resultados en la página de resumen.	32
Figura 18. Complejo del Instituto Santa Eugenia en el visor GoogleMaps.	34
Figura 19. Edificio 'A' del Instituto Santa Eugenia en el visor GoogleMaps.	35
Figura 20. Detalle de la junta de dilatación que separa las estructuras de los edificios 'A' y 'B' del Instituto Santa Eugenia.	35
Figura 21. Resumen de los resultados obtenidos para el Instituto Santa Eugenia de Girona. ..	37
Figura 22. Resultados obtenidos para el Instituto Santa Eugenia para un periodo de retorno de 475 años.	38
Figura 23. Resultados obtenidos para el Instituto Santa Eugenia para un periodo de retorno de 495 años.	39
Figura 24. Evaluación del daño y la seguridad considerando una tipología RC3.2 (pórtico irregular).	40

Lista de tablas

Tabla 1. Niveles de comportamiento sugeridos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995). ...	13
Tabla 2. Rangos de altura propuestos por el proyecto Risk-UE (Lungu et al., 2001; Mouroux et al., 2004)	15
Tabla 3. Umbrales de los estados de daño según el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004). 15	
Tabla 4. Tipologías consideradas en la metodología de Valcárcel (2013) y las referencias usadas para definir sus espectros de capacidad y curvas de fragilidad.	16
Tabla 5. Límites del índice de pérdida considerados por Valcárcel (2013) para cada estado de daño.	19
Tabla 6. Clases de suelo según la mesozonación sísmica de Catalunya.	25

Lista de anexos

Anexo 1. Análisis del Instituto Santa Eugenia como si fuera una tipología RC3.2	47
Anexo 2. Matriz Tipológica de Edificios (BTM) de la zona POCRISC	50

1 INTRODUCCIÓN

El plan de gestión de emergencias sísmicas de la región de Cataluña, SISMICAT (2003-2014), analizó el riesgo sísmico a escala municipal. Así que, se identificaron los municipios con riesgo sísmico significativo y se les pidió que redactaran sus propios planes de acción de emergencia sísmica más detallados. Como parte de estos planes locales de acción sísmica, se espera que los municipios identifiquen los edificios que son de especial importancia y evalúen su riesgo sísmico. Para contribuir al desarrollo de estos planes detallados de acción en caso de emergencia sísmica, ICGC ha creado, dentro del marco del proyecto POCRISC, una primera versión de un programa web interactivo que permite a los usuarios evaluar el riesgo y la seguridad sísmica para edificios de especial importancia. Este programa se conoce como ASSEE (**A**valuació de la **S**eguretat **S**ísmica d'**E**dificis d'**E**special importància, en catalán) que significa evaluación de la seguridad sísmica de edificios de especial importancia.

El programa ASSEE implementa la metodología para la evaluación de seguridad sísmica desarrollada por Valcárcel (2013) que consiste en una aplicación simplificada del método de espectro de capacidad para evaluar la seguridad sísmica de edificios de especial importancia como hospitales y escuelas. Esta metodología incluye pautas para estimar la acción sísmica que se espera que afecte al edificio y para evaluar su respuesta sísmica esperada, el daño sísmico probable y su nivel de seguridad asociado. Esta evaluación permite identificar las edificaciones esenciales que tienen un alto riesgo sísmico y que necesitan análisis de riesgo más detallados para determinar posibles acciones de mitigación de riesgos.

Esta primera versión de ASSEE se ha desarrollado para ser aplicada en Cataluña y ahora se encuentra en una fase de prueba. El usuario sólo tiene que especificar la información básica para el edificio de especial importancia a analizar y ASSEE realizará toda la evaluación de seguridad sísmica en solo unos pocos clics. El objetivo es ponerlo a disposición de los funcionarios municipales para que puedan realizar evaluaciones preliminares rápidas de seguridad sísmica de edificios individuales identificados como de especial importancia para el municipio. En versiones posteriores se prevé ampliar la capacidad y el ámbito geográfico de aplicación del programa.

1.1 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta para aplicar de manera sencilla la metodología propuesta por Valcárcel (2013) para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios esenciales mediante la comparación del daño evaluado con estándares y objetivos de comportamiento. Esta herramienta, de nombre ASSEE, está dirigida a técnicos de la administración con el conocimiento adecuado para determinar la tipología estructural de los edificios en consideración. Los resultados obtenidos de la evaluación de la seguridad sísmica serán útiles para la priorización de acciones dirigidas a la mitigación del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales.

Valcárcel (2013) desarrolló la metodología y definió los datos de entrada relacionados con la peligrosidad sísmica para la zona de Cataluña. Por esto, otro de los objetivos de este trabajo, dentro del proyecto POCRISC, es extender esta aplicación de la metodología a toda la zona

de estudio del proyecto y que coincide con la zona del ShakeMap para el Pirineo que se muestra en la Figura 1. También, otro objetivo es realizar un taller de entrenamiento dirigido a técnicos municipales para entrenarlos en su uso.

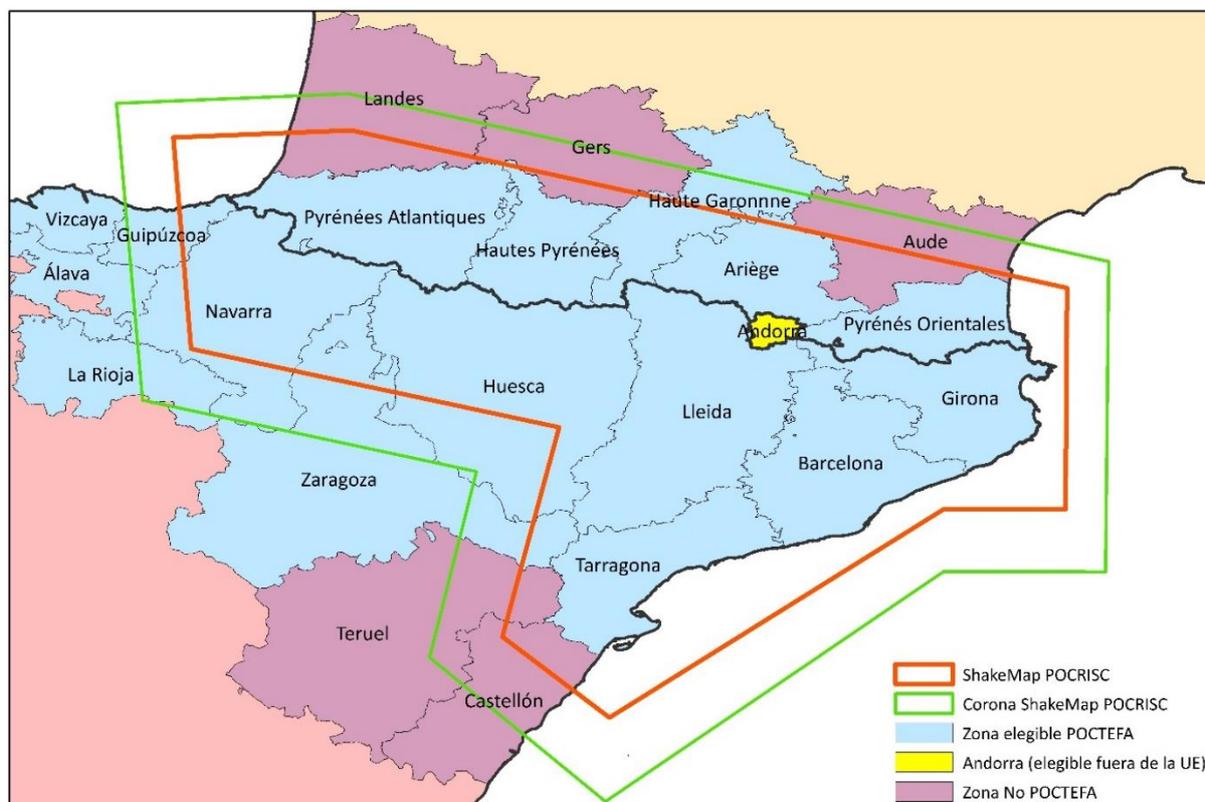


Figura 1. Delimitación de la zona de estudio del mapa ShakeMap de POCRISC (línea en naranja), su zona de influencia (línea en verde) y las provincias que abarca.

2 METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA SEGURIDAD SÍSMICA

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.

La metodología propuesta por Valcárcel (2013) se puede resumir como sigue:

- Estimación de la acción sísmica que pueda afectar al edificio considerado
- 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 del edificio mediante la comparación del daño evaluado con estándares y objetivos de comportamiento.

El esquema en la Figura 2 engloba la metodología partiendo de los elementos definidos por el edificio y su emplazamiento y pasando por la metodología para evaluar la seguridad sísmica.

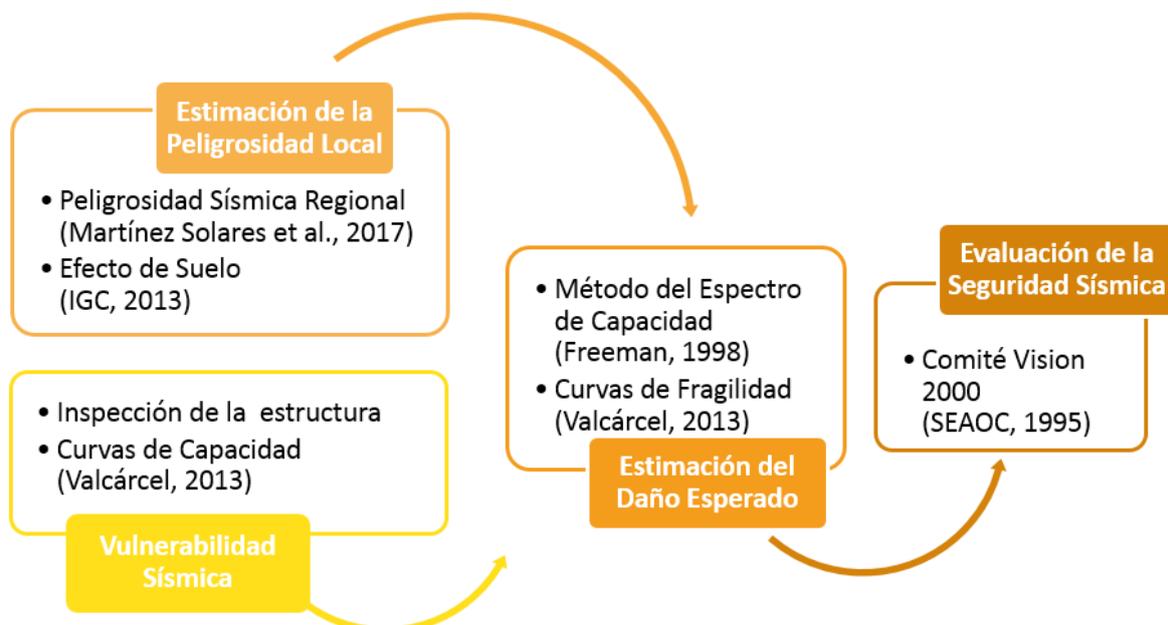


Figura 2. Esquema del proceso de la metodología para la evaluación de la seguridad propuesta por Valcárcel (2013).

En los siguientes subapartados se explicarán los principales conceptos de la metodología, mientras que los datos de entrada referentes a la zona de estudio como la acción sísmica y las tipologías estructurales se discutirán en el apartado 3.

2.1 Seguridad Sísmica

Según lo recomendado por Valcárcel (2013), la evaluación de seguridad sísmica incluida en ASSEE se basa en los requisitos de comportamiento sísmico sugeridos por el Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) que se muestran en la Figura 3 y la Tabla 1. Según el Comité, se espera que los edificios especiales e importantes exhiban un mejor comportamiento que los edificios normales, ya que deberían permanecer, al menos, operativos después de un evento sísmico raro (período de retorno de 475 años) y no colapsar durante un evento sísmico muy raro (período de retorno de 975 años). En términos de niveles de comportamiento, estos requisitos implican que estos edificios deben cumplir con el nivel de comportamiento Operacional (daño leve a moderado) para un período de retorno de 475 años y con el de Seguridad de la Vida (daño moderado a extenso) para un período de retorno de 975 años. Así que, evaluar la seguridad sísmica de un edificio de especial importancia implica determinar si el edificio considerado cumple con estos niveles de comportamiento.

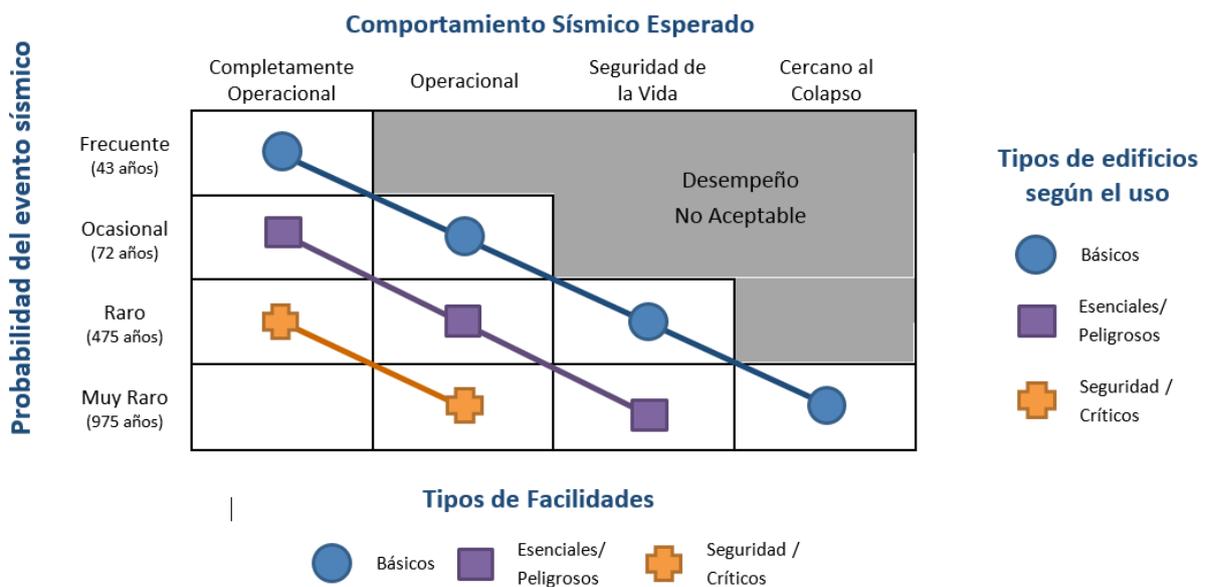


Figura 3. Requisitos basados en el comportamiento sísmico según el Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995).

Entonces, para evaluar la seguridad sísmica de un edificio de especial importancia, se necesita estimar el grado de daño medio esperado asociado a períodos de retorno de 475 y 975 años. En este sentido, la metodología ASSEE integra el método del espectro de capacidad para evaluar el grado de daño medio, estimando la curva de capacidad requerida para la estructura a partir de su tipología estructural y proporcionando un espectro de respuesta específico del sitio incluyendo efectos del sitio para períodos de retorno de 475 y 975 años dependiendo sobre la ubicación del edificio estudiado dentro de la región de Cataluña.

Tabla 1. Niveles de comportamiento sugeridos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995).

Nivel de comportamiento	Descripción	Estado de daño	Periodo de retorno (años)
Totalmente operacional	Servicio continuo. Sin daño 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	Daño moderado; 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

2.2 Método del espectro de capacidad

De acuerdo con el informe ATC 40 (ATC, 1996), el rendimiento sísmico de un edificio es evaluado mediante el cruce entre su espectro de capacidad y el espectro de demanda, en lo que se conoce como el método del espectro de capacidad (Freeman, 1998) (Figura 4).

La curva de capacidad de un edificio puede definirse a través de un análisis “pushover” 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 considerar el comportamiento inelástico de la estructura.

La intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda es conocida como el punto de rendimiento, “*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 es la usada 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 rendimiento. 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 5 se presentan los procedimientos para encontrar las coordenadas del punto de capacidad por demanda. En esta figura se detalla el procedimiento para determinar el espectro de demanda.

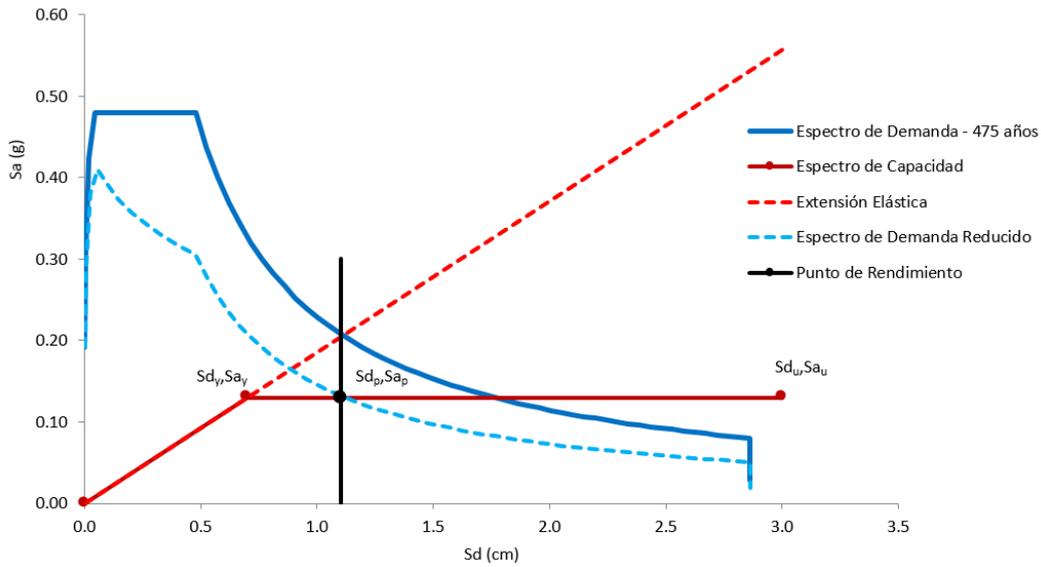


Figura 4. Esquema gráfico del método del espectro de capacidad.

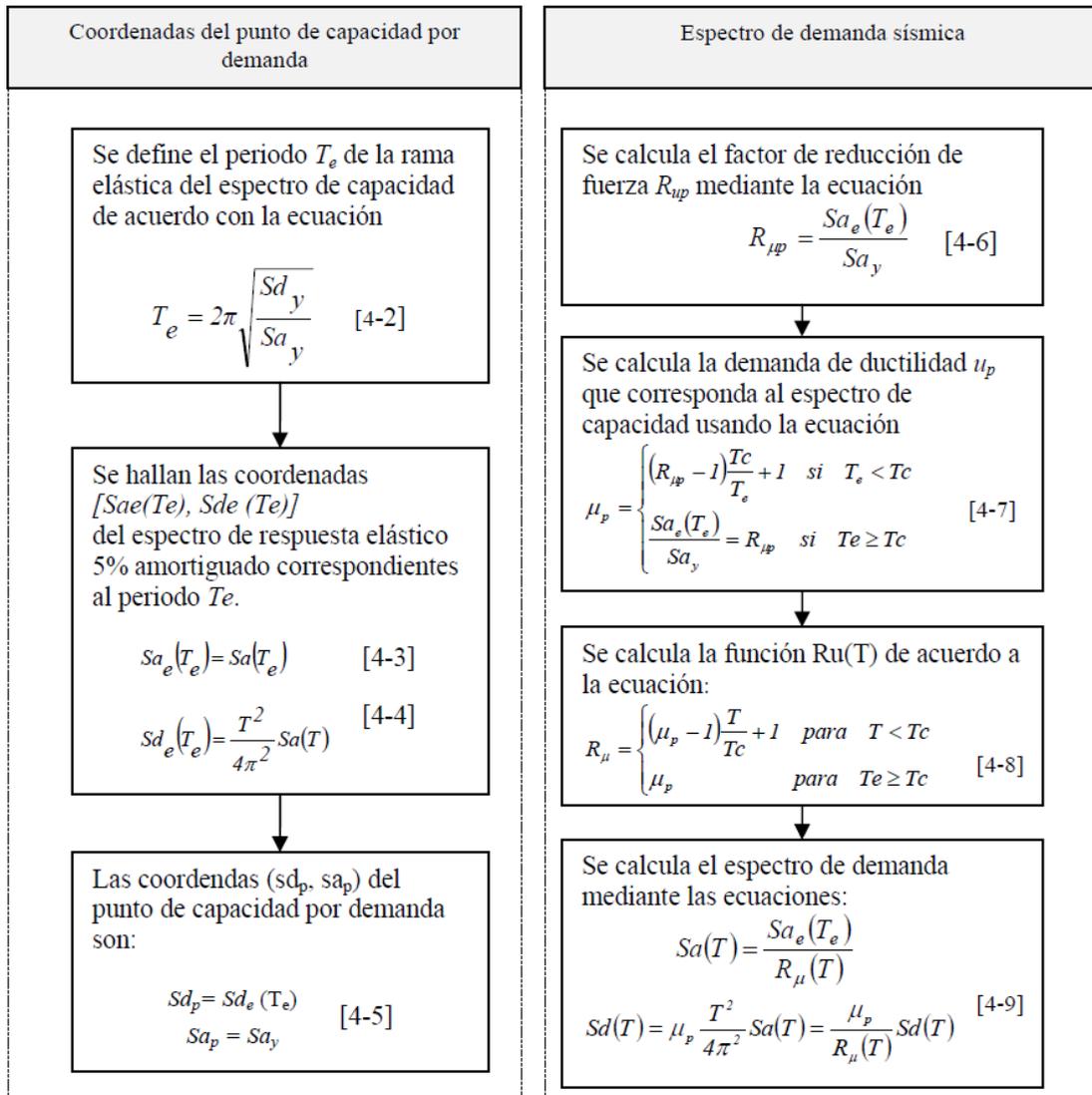


Figura 5. Cálculo del punto de capacidad por demanda y del espectro de demanda (Valcárcel, 2013).

2.3 Tipología estructural

La metodología de Valcárcel (2013) requiere identificar la tipología estructural del edificio que se analiza. Dicha identificación de la tipología estructural se puede lograr realizando una inspección visual de los edificios y/o analizando las memorias constructivas y planos, tanto arquitectónicos como estructurales. Para Cataluña, existen formularios de vulnerabilidad sísmica que pueden contribuir a este objetivo (IGC y UPC 2010).

La metodología ASSEE incluye un conjunto de tipologías estructurales para las cuales Valcárcel (2013) recomienda tanto un espectro de capacidad bilineal como las correspondientes curvas de fragilidad. Este conjunto de tipologías se seleccionó de proyectos anteriores, como RISK-UE (Mouroux et al.2004) e ISARD (Roussillon et al.2006), en los que se identificaron los tipos de edificación más representativos de la región. Además, para cada una de las tipologías estructurales, se consideran 3 intervalos de altura (Tabla 2) y para cada una Valcárcel (2013) recomienda curvas de capacidad y fragilidad específicas (Tabla 4).

Tabla 2. Rangos de altura propuestos por el proyecto Risk-UE (Lungu et al., 2001; 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

2.4 Curvas de fragilidad

Una vez obtenido el punto de capacidad por demanda, su desplazamiento permite obtener la distribución de probabilidad de daño utilizando las curvas de fragilidad disponibles para cada tipología estructural (Valcárcel, 2013). Las curvas de fragilidad (Figura 6) definen la probabilidad de que el daño esperado iguale o supere un grado de daño específico.

Se consideran cuatro grados 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 3 muestra los criterios para definir los umbrales de los estados de daño recomendados por el proyecto RISK-UE e implementados por Valcárcel (2013) en esta metodología. Los umbrales de los estados de daño corresponden a aquellos desplazamientos espectrales para lo que la probabilidad de excedencia del estado de daño es del 50%.

Tabla 3. Umbrales de los estados de daño según el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004).

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

Tabla 4. Tipologías consideradas en la metodología de Valcárcel (2013) y las referencias usadas para definir sus espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

Tipología	Descripción	Referencia
M1.1	Estructuras de muros de fábrica de piedras o cantos rodados (mampostería ordinaria).	RISK UE (Milutinovic i Trendafiloski (2003); Curvas de la Università degli Studi di Genova (UNIGE) para edificios sin diseño sismorresistente.
M1.2	Estructuras de muros de fábrica con piedra labrada (mampostería concertada)	
M3.4	Estructuras de muros de fábrica de ladrillo o bloque de hormigón sin armar con forjados de hormigón armado	
M1.3	Estructuras de muros de fábrica con sillería. Techos con viguetas de madera.	Giovinazzi (2005)
M2	Estructuras de muros de tierra amasada.	
M3.1	Estructuras de muros de fábrica de ladrillo sin armar con forjados de madera	
M3.2	Estructuras de muros de fábrica de ladrillo sin armar con bóvedas de fábrica	
M3.3	Estructuras de muros de fábrica de ladrillo o bloque de hormigón sin armar con forjados de vigas de acero y bovedillas de cerámica	Bonett (2003)
M4	Estructuras de muros de fábrica armada o confinada	Ruiz-García et al. (2010)
RC1	Pórticos de hormigón resistentes a momentos. Alta o muy alta ductilidad.	RISK UE (Milutinovic i Trendafiloski (2003) Curvas de la Universidad Aristóteles de Tesalónica (AUTH) para edificios con diseño sismorresistente de bajo nivel.
RC2	Muros estructurales de hormigón (de cortante)	
RC3.1	Pórticos regulares de hormigón con relleno regular de fábrica de ladrillo sin armar	
RC4	Sistemas duales de hormigón armado.	
RC3.2	Pórticos irregulares de hormigón (p.e., estructura irregular, relleno irregular, piso blando/débil)	Moreno (2006)
RC5	Muros de hormigón prefabricado con forjados prefabricados de hormigón armado o pretensado	Wilson et al. (2008)
RC6	Pórticos prefabricados sin nudos rígidos arriostrados por muros estructurales	Biondini et al. (2008) i Biondini et al. (2010)
S1	Pórticos de acero con nudos rígidos resistentes a momento	HAZUS MH (FEMA/NIBS, 2003)
S3	Pórticos metálicos con rellenos de fábrica sin armar	
S4	Pórticos metálicos arriostrados con muros estructurales de hormigón	
W	Estructuras de madera	

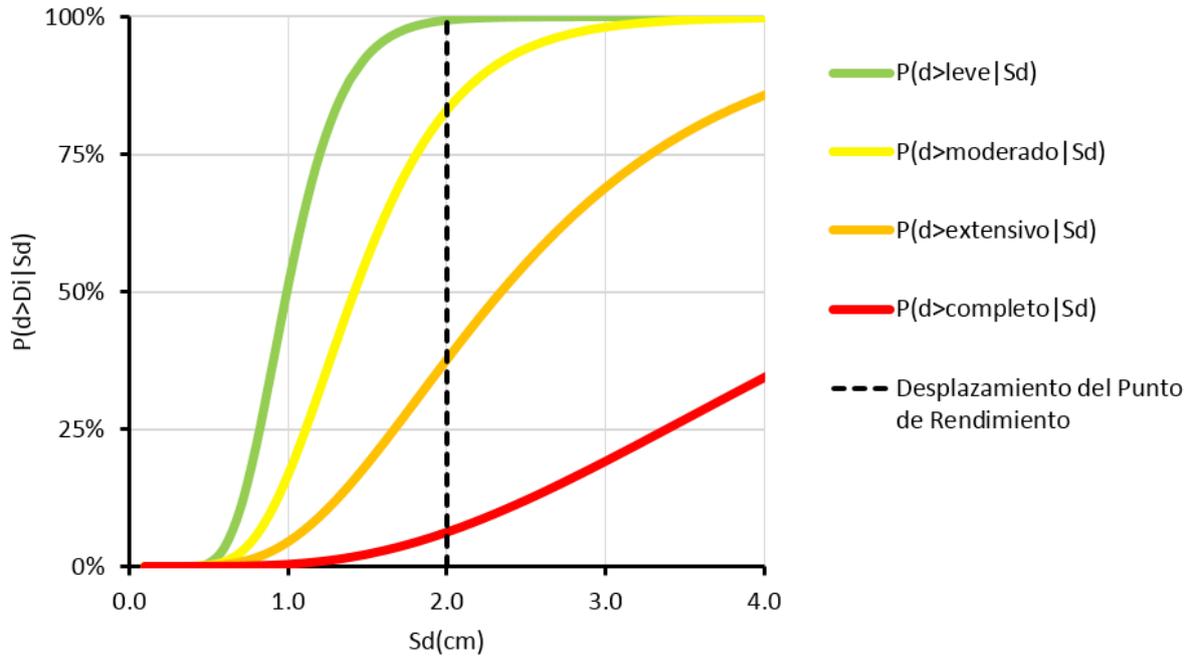


Figura 6. Ejemplo de curvas de fragilidad utilizadas para obtener las probabilidades de los estados de daño.

En el proyecto RISK-UE, las curvas de fragilidad siguen una distribución de probabilidad lognormal (Ecuación 1) y se definen a través del umbral o valor medio del estados de daño, $\bar{S}_{d,ds}$, (el desplazamiento espectral correspondiente a cada estado de daño, ds , según los criterios establecidos en la Tabla 3) y su desviación estándar β_{ds} .

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

en donde:

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

$\bar{S}_{d,DSi}$ es el umbral del estado de daño i . Es decir, aquel para el que la probabilidad de excedencia es del 50% y es el valor medio de la distribución lognormal de la Ecuación 1,

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 S_d de la función de densidad de probabilidad.

2.5 Matrices de probabilidad de daño 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 rendimiento (Sd_p), es posible estimar las probabilidades de excedencia de cada estado de daño $P[ds > DS_i | Sd_p]$. 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 .

$$P[ds = DS_i | Sd_p] = P(ds \geq DS_{i+1} | Sd_p) - P(ds > DS_i | Sd_p) \quad i=1 \dots (N-1) \quad (2)$$

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.

$$P[ds \geq DS_i | Sd_p] = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} P(ds = DS_j | Sd_p) \quad (3)$$

Téngase en cuenta que, para el estado de daño nulo, o no daño, la curva de fragilidad es la unidad, dado que siempre, la probabilidad de que se gualo o exceda el daño nulo es la unidad. Por último, el grado de daño medio (GDM) 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 (GDMn), 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

La metodología utiliza el grado de daño medio esperado para evaluar si el edificio considerado cumple con los niveles de comportamiento sísmico sugeridos por el Comité VISION 2000.

Considerando la escala de daño sugerida por Rossetto y Elnashai (2003), Valcárcel (2013) estableció que, para eventos de periodo de retorno de 475 años, el grado de daño medio no debe ser superior a 2 (daño moderado), el cual corresponde a un valor de 0.5 cuando el grado de daño medio se normaliza por el número de estados de daño (cuatro en este caso). De forma análoga, para eventos de periodo de retorno de 975 años, el grado de daño medio no debe ser superior a 2.8, el cual corresponde a un valor de 0.7 cuando se normaliza por el número de estados de daño.

Por lo tanto, para cumplir con el nivel de comportamiento Operacional el edificio esencial debe tener un grado de daño medio esperado inferior o igual a 2.0 para un periodo de retorno de 475 años. Para cumplir con el nivel de comportamiento de Seguridad de la Vida, el grado de daño medio para un periodo de retorno de 975 años debe ser igual o inferior a 2.8.

2.7 Índice de pérdida económica

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 pérdida están definidos por funciones de pertenencia tal como se presenta en la Figura 7.

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 corresponden 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 calculan como sigue:

$$\chi_{DS}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq \text{linf}_{DS} \\ 1 - \left(\frac{V \text{max}_{DS} - x}{(V \text{max}_{DS} - \text{linf}_{DS})^2} \right) & \text{si } \text{linf}_{DS} < x < V \text{max}_{DS} \\ 1 - \left(\frac{x - V \text{max}_{DS}}{(\text{lsup}_{DS} - V \text{max}_{DS})^2} \right) & \text{si } V \text{max}_{DS} < x < \text{linf}_{DS} \\ 0 & \text{si } x > \text{lsup}_{DS} \end{cases} \quad (4)$$

En la Ecuación 4 linf_{DS} corresponde al límite inferior de la función de pertenencia del estado de daño DS . $V \text{max}_{DS}$ corresponde al valor de máxima pertenencia y lsup_{DS} corresponde al límite superior de la función de pertenencia. En la Tabla 5 se presentan los límites del índice de pérdida considerados por Valcárcel (2013) para cada estado de daño.

Tabla 5. Límites del índice de pérdida considerados por Valcárcel (2013) para cada estado de daño.

Grado de Daño	Índice de Pérdida Económica		
	Límite Inferior (linf_{DS}) (%)	Abscisa del Valor Máximo ($V \text{max}_{DS}$) (%)	Límite Superior (lsup_{DS}) (%)
Nulo	0	2.5	5
Leve	0	10	20
Moderado	5	25	40
Extensivo	30	35	70
Completo	50	90	100

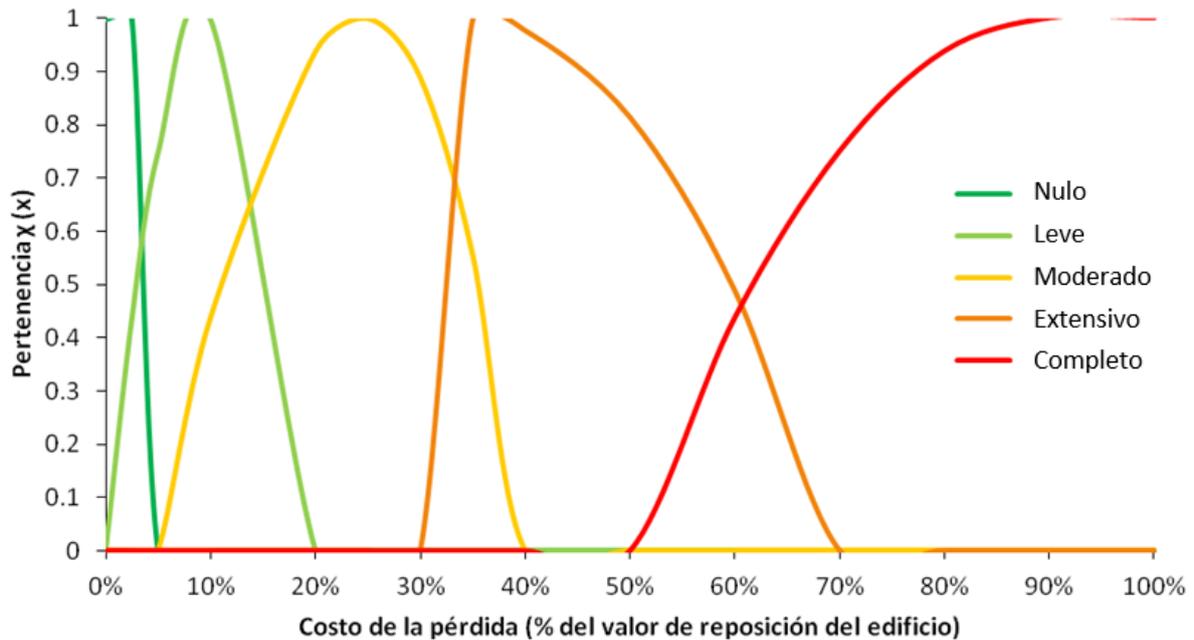


Figura 7. Funciones de pertenencia adoptadas por Valcárcel (2013) para la evaluación del índice de pérdida económica.

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

- Estimar la matriz de probabilidad de daño del edificio para el escenario considerado.
- Para cada estado de daño, multiplicar (normalizar) las ordenadas de las funciones de pertenencia por la probabilidad de daño correspondiente, de acuerdo con 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.

2.8 Índice de funcionalidad y tiempo de recuperación

El índice de funcionalidad, $L_f(GDMn)$, y la estimación del tiempo de recuperación, en días, que propuso Valcárcel (2013), se definen en función del grado de daño medio normalizado, $GDMn$, tal y como se muestra en las Ecuaciones 5 y 6. La Ecuación 6 representa la forma lineal ajustada para los valores recomendados por Valcárcel (2013) para los diferentes estados de daño adoptada para ser incluida en la herramienta ASSEE. La Figura 8 presenta el índice de funcionalidad y el tiempo de recuperación estimado en términos del grado de daño medio normalizado.

$$L_f(GDMn) = \begin{cases} 1 - 0.5GDMn & \text{si } GDMn \leq 0.2 \\ \exp(\text{LOG}(0.5) \left(\frac{GDMn}{0.3}\right)^3) & \text{si } 0.2 < GDMn \leq 0.7 \\ 0 & \text{si } GDMn > 0.7 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Tiempo de recuperación (días)} = GDMn * \frac{110}{0.35} \quad (6)$$

donde:

$L_f(GDMn)$ es el índice de funcionalidad

GDMn es el grado de daño medio normalizado

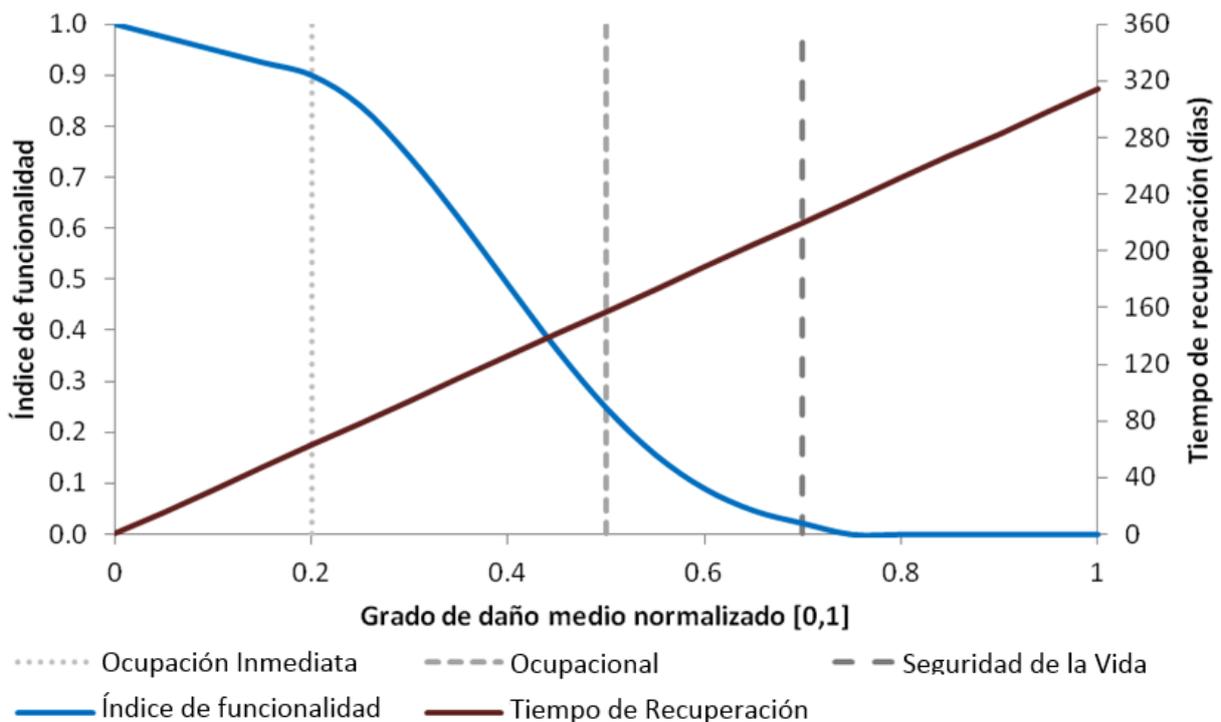


Figura 8. Índice de funcionalidad y tiempo de recuperación según el grado de daño medio normalizado.

2.9 Alcance de la metodología y sus resultados

Debido a las características de la metodología y de las simplificaciones que ésta representa frente a la realización de un análisis detallado de un edificio, Valcárcel (2013) establece las limitaciones del alcance para tener en cuenta, a la hora de interpretar los resultados que se obtienen con la herramienta ASSEE.

2.9.1 Uso de los resultados

Los procedimientos empleados en la metodología corresponden a evaluaciones preliminares de la seguridad y riesgo sísmico de edificios 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. De esta manera los resultados obtenidos, en ningún caso pueden sustituir a los de un análisis avanzado y detallado realizado específicamente para el edificio considerado.

2.9.2 Simplificaciones en la descripción de los edificios

En esta metodología los edificios se clasifican en tipologías estructurales simplificadas. En la clasificación, además del tipo de construcción, se tiene en cuenta la altura. Al respecto, Grossi y Kunreuther (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 el riesgo potencial de los edificios considerados.

2.9.3 Vulnerabilidad y daño

La estimación de daños de esta metodología se limita a la consideración del principal sistema estructural del edificio. Para la estimación del daño esperado no se considera la contribución de la fragilidad /vulnerabilidad de los elementos no estructurales del edificio analizado ni las características específicas del edificio. Tampoco se incluyen los daños en líneas vitales y sus efectos en la funcionalidad de los edificios ni los asociados a explosiones, derrames de sustancias peligrosas, o eventos similares.

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

En este estudio se han adoptado valores seleccionados por Valcárcel (2013) de entre diversos autores para estimar, de acuerdo con el daño esperado de los edificios, el índice de funcionalidad, el índice de pérdida económica y el tiempo esperado de recuperación. Estos valores y estudios no están adaptados al entorno del Pirineo, donde se están aplicando, por lo que deben considerarse como valores orientativos y tomarse en perspectiva. Es relevante conocer la opinión y criterio de los responsables de los servicios esenciales, así como de técnicos de la construcción, en cuanto al periodo que puede tardar un determinado tipo de instalación en recuperarse después del daño sufrido por un evento sísmico y la revisión de bases de datos, así como de informes de situaciones de emergencia, en los cuales se puedan obtener datos para validar los valores obtenidos para estos índices.

3 EVALUACIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA

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. 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, para disponer de una forma analítica sencilla, suelen adaptarse a las formas espectrales sugeridas en códigos sismorresistentes como el Eurocódigo 8 (EC8) (CEN, 2004).

3.1 Peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica local utilizada para la evaluación del peligro sísmico se presenta en forma de espectros de respuesta de aceleración. En la actualidad, los espectros de respuesta de aceleración incluidos en la herramienta ASSEE se derivan del Análisis Probabilístico de peligrosidad Sísmica (PSHA por sus siglas en inglés) desarrollado para Cataluña (IGC y GEOTER, 2008). Este estudio produjo mapas de aceleración espectral para varios periodos estructurales que permiten construir espectros de respuesta de aceleración para cualquier sitio de Cataluña para periodos de retorno de 475, 975 y 1975 años, no solo para valores medios, sino también para varios percentiles más. En la versión actual de la normativa sísmica española (NCSE-02, 2002), las aceleraciones recomendadas para la región de Cataluña son inferiores a las obtenidas por el estudio IGC y GEOTER (2008). Dado que el estudio de IGC y GEOTER (2008) está más actualizado que el de la NCSE-02, y además estima mayores niveles de peligrosidad sísmica en Cataluña, este último estudio fue elegido para representar el peligro sísmico de la región.

Posteriormente, se ha publicado un nuevo mapa de peligrosidad sísmica probabilista para España (Martínez Solares et al., 2017), que se espera sea la base para la peligrosidad sísmica en la próxima actualización de la normativa sísmica española. Dado que esta nueva estimación de peligrosidad sísmica para España proporciona niveles mayores de peligrosidad, que los del estudio de IGC y GEOTER (2008) (Figura 9) y porque se considerará el estándar para el diseño sísmico en España, se prevé que versiones superiores de la metodología para la evaluación de la seguridad sísmica incorporen este nuevo estudio para la selección de los espectros de respuesta de aceleración; tanto más si, como es previsible, este mapa pasa a ser el mapa de referencia para la normativa sísmica española.

3.2 Efectos de suelo

Los efectos del suelo se consideran a partir del mapa de mesozonación sísmica de Cataluña (MSC) (IGC, 2013) a una escala de 1: 100.000 (Figura 10) desarrollado en el marco del

proyecto SISPYR (2013). El mapa de mesozonación sísmica se basa en el mapa geológico de Cataluña y considera la clasificación del suelo según su potencial de amplificación sísmica.

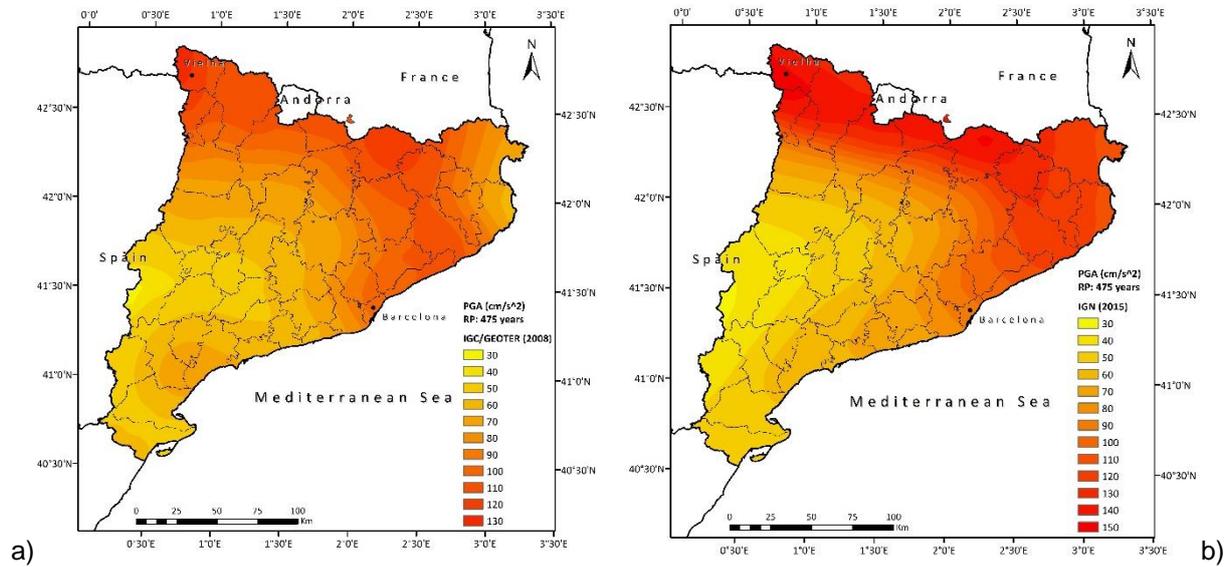


Figura 9. Comparación entre los mapas de PGA para un período de retorno de 475 años de (a) el estudio PSHA de IGC y GEOTER (2008) y (b) la nueva evaluación PSHA para España de Martínez Solares et al. (2017).

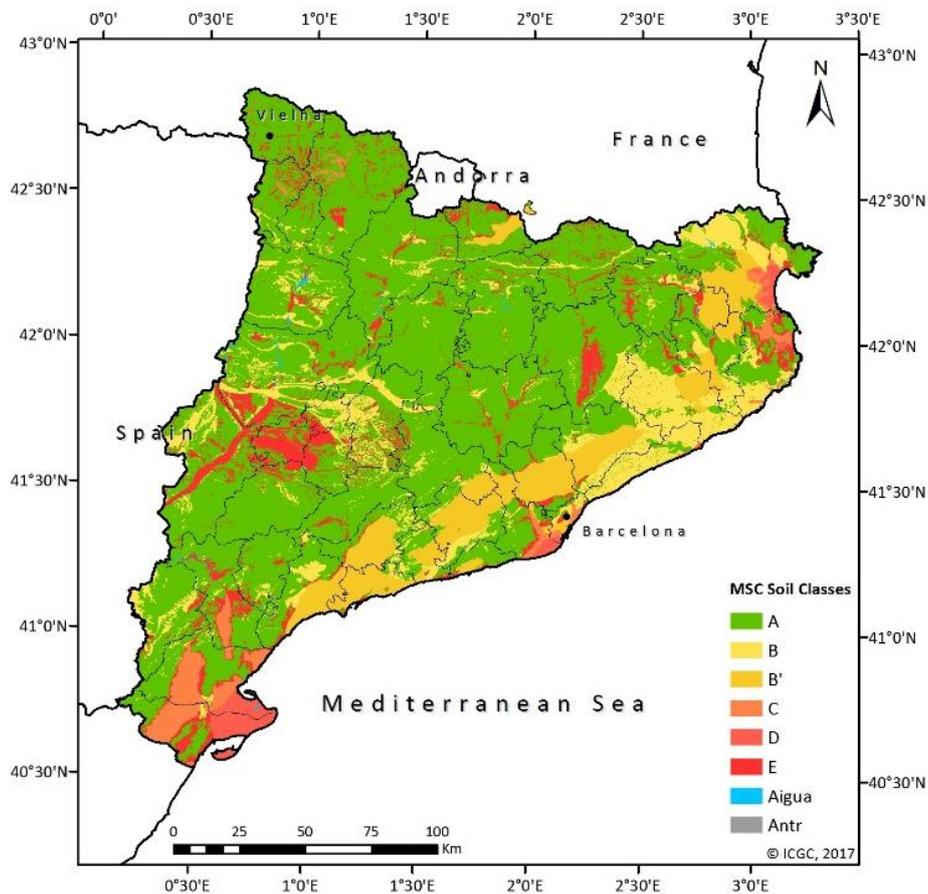


Figura 10. Mapa de mesozonación sísmica de Cataluña (MSC), escala 1: 100M.

La clasificación de suelos de la mesozonación de Cataluña incluye un total de 6 clases de suelo (Tabla 6) para las cuales la configuración típica de la capa se muestra en la Figura 11. Esta clasificación de suelos se inspiró en el Eurocódigo 8 pero fue adaptada a los suelos específicos identificados en la región de Cataluña y considera las características geomecánicas del suelo, su espesor y el contraste de la velocidad de las capas adyacentes.

Para cada clase se obtuvo un espectro de respuesta de aceleración normalizado incluyendo los efectos del suelo, para cada una de las clases de suelo, permitiendo, de esta manera, obtener un espectro de respuesta de aceleración local, adecuado a las condiciones del suelo para cada una de las edificaciones de especial importancia que se analizan (Colas et al. 2012; IGC 2012b). Estos espectros de respuesta de aceleración normalizados con efectos de suelo se muestran en la Figura 12.

Tabla 6. Clases de suelo según la mesozonación sísmica de Catalunya.

Clase de suelo	Descripción
A	Terrenos en el cuales aflora la roca bien consolidada o que está recubierta de un espesor de material más blando inferior a 5 m.
B	Terrenos formados por arena o grava muy densas, arcillas muy rígidas o rocas sedimentarias con un grado de consolidación medio, con un espesor inferior a 100 m y con recubrimiento inferior a 20 m de terrenos blandos o muy blandos. Por debajo de estos materiales se encuentra un substrato
B'	Terrenos formados por depósitos de arenas o gravas muy densas, arcillas muy rígidas o rocas sedimentarias con un grado de consolidación medio y con un espesor superior a 100 m.
C	Terrenos formados por depósitos de arena o gravas densas y arcillas rígidas con espesores que oscilan de 20 a 100 m y que recubren un substrato rocoso.
D	Terrenos formados por depósitos de arenas finas y limos poco densos o arcillas de blandas a medianamente rígidas de un espesor que oscila entre 20 y 100 m y que recubren un substrato rocoso.
E	Terrenos formados por depósitos de arenas finas y limos poco densos o arcillas de blandas a medianamente rígidas de un espesor que oscila entre 5 y 20 m y que recubren un substrato rocoso bien consolidado (clase A).

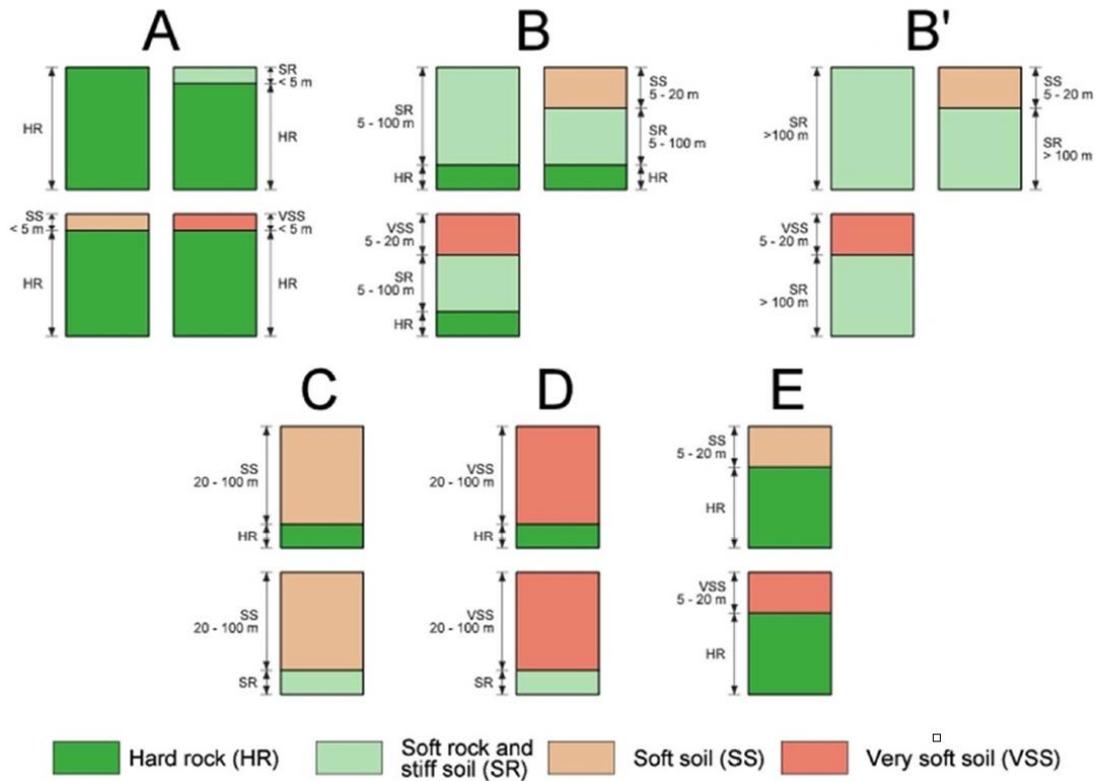


Figura 11. Diversas configuraciones para las 6 clases de suelo identificadas en el estudio de mesozonación sísmica de Cataluña.

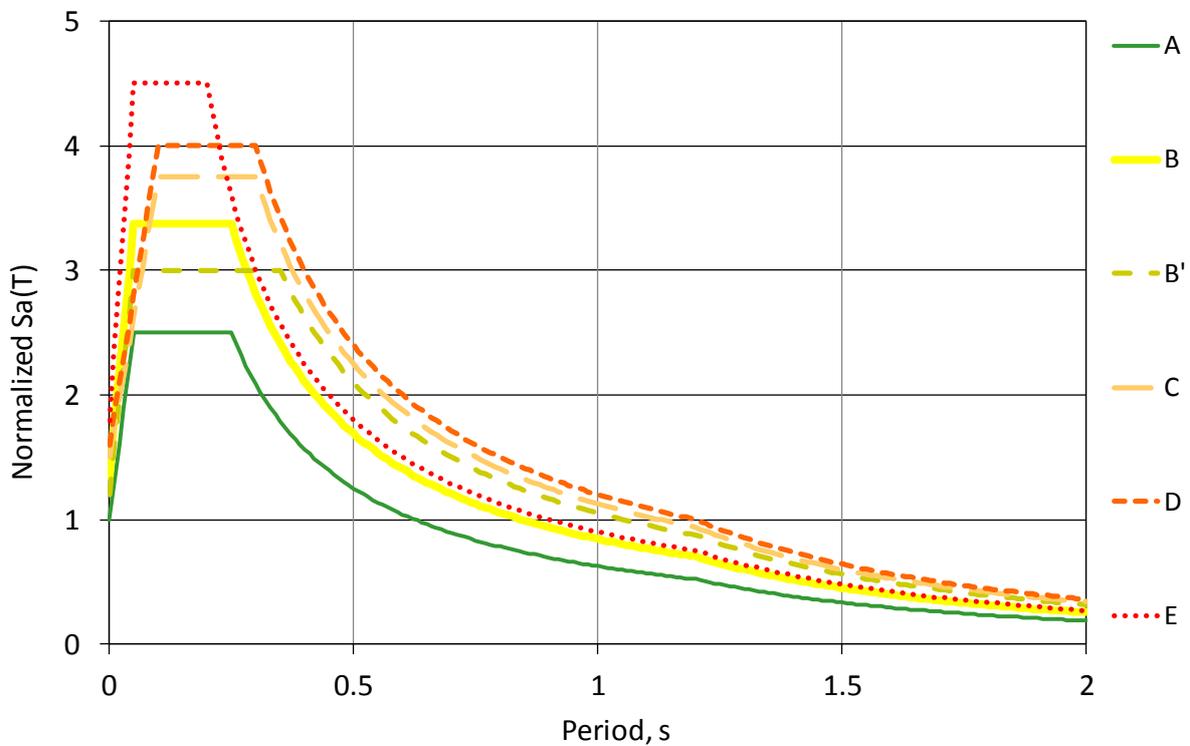


Figura 12. Espectros de respuesta de aceleración normalizados para cada clase de suelo de mesozonación (Colas et al., 2012).

4. HERRAMIENTA WEB ASSEE

La herramienta ASSEE implementa la metodología de Valcárcel (2013) para la evaluación de la seguridad sísmica y las fichas de resultados y resumen de resultados diseñadas por Bosch (2013) e Irizarry et al. (2014). La herramienta opera en un entorno web que facilita, tanto su puesta en funcionamiento, como su actualización. Actualmente, se cuenta con una primera versión en periodo de pruebas. Cuando se ponga en funcionamiento, sólo estará disponible para usuarios registrados que solo tendrán que ingresar alguna información básica del edificio analizado para obtener una evaluación detallada del daño sísmico esperado y la seguridad para períodos de retorno de 475 y 975 años, siguiendo la metodología presentada por Valcárcel (2013).

4.1 Arquitectura del sistema

La herramienta ASSEE se ha desarrollado utilizando Ruby on Rails (marco del lenguaje de programación Ruby en el marco Rails; <https://rubyonrails.org/>). La base de datos para almacenar y administrar los datos y metadatos del programa es PostgreSQL (<https://www.postgresql.org/>) e incluye la extensión PostGIS (<https://postgis.net/>) para la información geoespacial.

Las páginas web que componen la interfaz gráfica de usuario (GUI) son compatibles con W3C y se han desarrollado utilizando lenguaje HTML5. Además, el formato CSS 3 y el lenguaje Javascript se utilizan para definir los estilos visuales y las opciones interactivas disponibles. También se utiliza Twitter Bootstrap 3 para el diseño y la distribución del sitio web.

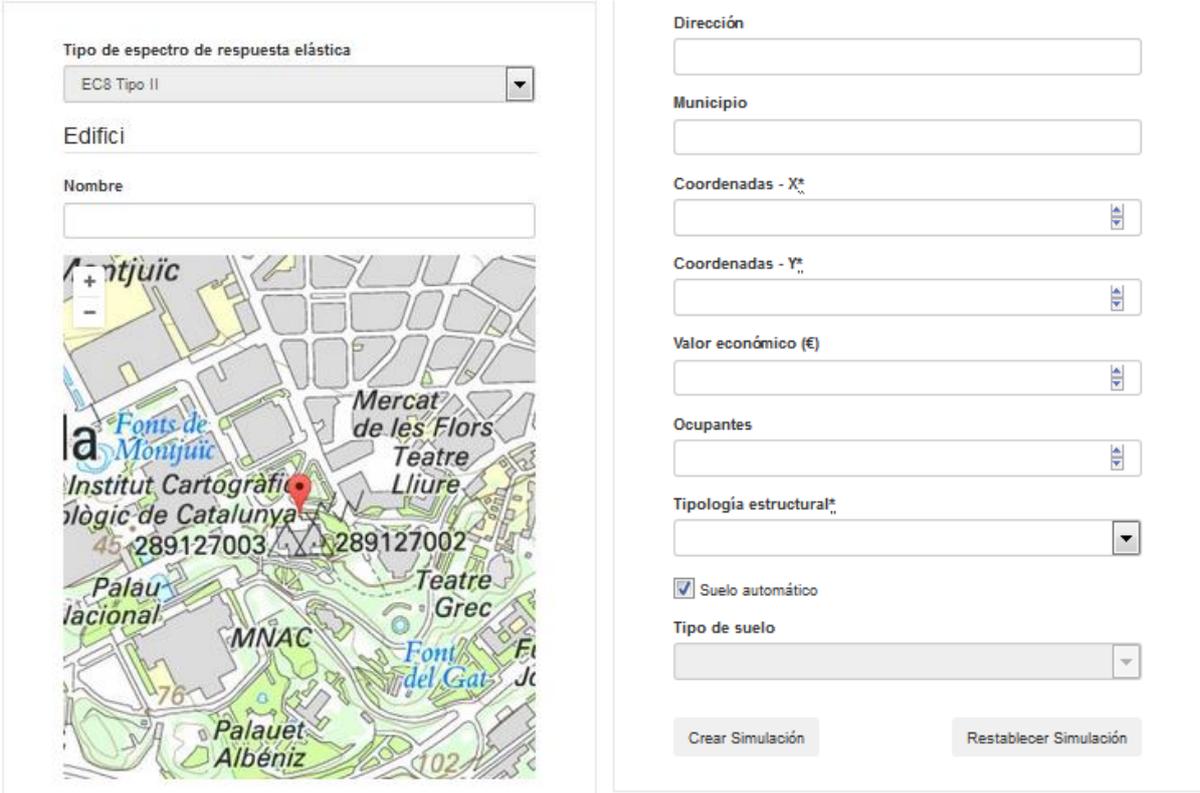
Además de la interfaz de usuario diseñada para la entrada de datos y visualización de los resultados, ASSEE también tiene una interfaz web para administrar la aplicación que permite controlar determinadas variables del análisis y gestionar los usuarios del sistema.

4.2 Datos de Entrada

El usuario de la herramienta ASSEE deberá proporcionar información básica sobre la estructura a analizar. Después de iniciar sesión en la plataforma web, el usuario accede a la página de entrada (Figura 13) donde se recopilan todos los datos de entrada sobre el edificio. Los datos de entrada sobre el edificio incluyen el nombre, la dirección, el municipio, las coordenadas UTM, el valor económico, el número de ocupantes, la tipología estructural y la clase de suelo de su sitio. Los datos mínimos necesarios para que se ejecute el programa se indican con un asterisco (*). Estos requisitos mínimos se reducen a tres y son: las coordenadas de la ubicación del edificio, su tipología estructural y la clase de suelo sobre el que se ha edificado el edificio.

Por otra parte, y para facilitar más el uso de la herramienta, se han considerado varias disposiciones para ayudar al usuario a identificar las coordenadas y la clase de suelo. Así, ASSEE puede determinar estas variables automáticamente según la ubicación del edificio o el usuario puede optar por ingresarlas manualmente. En el caso de que se desconozcan las

coordenadas, el usuario puede buscar visualmente el edificio en el mapa disponible y, al hacer clic en él, se completarán automáticamente los campos de dirección, municipio y coordenadas. Si no se dispone de información específica del sitio para determinar la clase de suelo donde se encuentra el edificio, el usuario puede activar la identificación automática de la clase de suelo y ASSEE localizará la clase de suelo para el sitio, ubicándola en el mapa de mesozonación sísmica de Cataluña.



The screenshot displays the ASSEE software interface, divided into two main sections. On the left, there is a map of Barcelona with a red pin marking a location near the Institut Cartogràfic de Catalunya. The map includes labels for various landmarks such as 'Font de Montjuïc', 'Mercat de les Flors', 'Teatre Lliure', 'MNAC', and 'Palauet Albéniz'. Above the map, there are input fields for 'Edifici' and 'Nombre', and a dropdown menu for 'Tipo de espectro de respuesta elástica' set to 'EC8 Tipo II'. On the right side, there is a form with several input fields: 'Dirección', 'Municipio', 'Coordenadas - X*', 'Coordenadas - Y*', 'Valor económico (€)', 'Ocupantes', and 'Tipología estructural*'. There is also a checked checkbox for 'Suelo automático' and a dropdown for 'Tipo de suelo'. At the bottom of the form, there are two buttons: 'Crear Simulación' and 'Restablecer Simulación'.

Figura 13. Ejemplo de una página de entrada de ASSEE.

4.3 Resultados del programa

Unos pocos segundos después de presionar el botón “crear simulación”, el usuario obtendrá los resultados para revisar en pantalla en un informe resumido propuesto por Bosch (2013) e Irizarry et al. (2018). Estos resultados deben imprimirse o descargarse en formato PDF para que el usuario los guarde, ya que no existe una base de datos para que ASSEE los almacene.

El informe de resultados consta de 3 páginas. La primera página presenta los resultados de todo el proceso de evaluación de seguridad sísmica para un período de retorno de 475 años, mientras que la segunda hace lo mismo, pero para un período de retorno de 975 años (Figura 14). La tercera página del informe de resultados proporciona un resumen comparativo de los resultados tanto para los períodos de retorno como para el análisis de la seguridad sísmica de la estructura (Figura 15).

Periodo de retorno 475

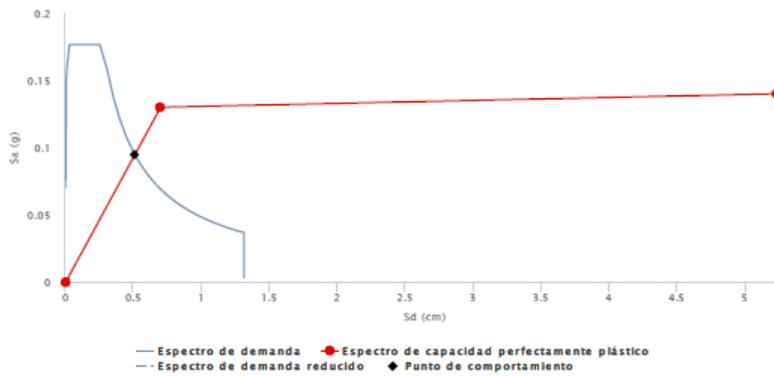
Acción Sísmica

Espectro: EC8 Tipo II Período de retorno (años): 475 PGA_rocka(g): 0,05
 Tipo de suelo: B Selección suelo: Manual PGA_suelo(g): 0,07

Comportamiento del edificio

Tipología estructural: RC32L

Punto de capacidad por demanda

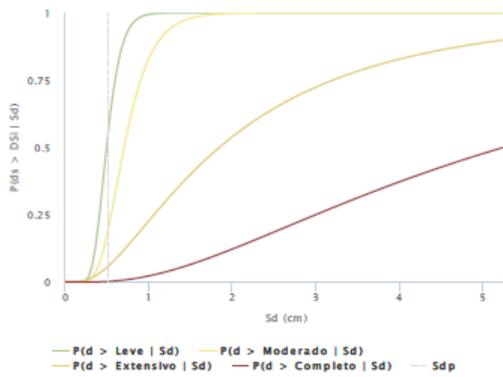


Espectro de capacidad	
Sd _u (cm)	5,24
San (g)	0,14
Sd _y (cm)	0,70
San (g)	0,13
Punto de comportamiento	
Sd _p (cm)	0,51
San (g)	0,09

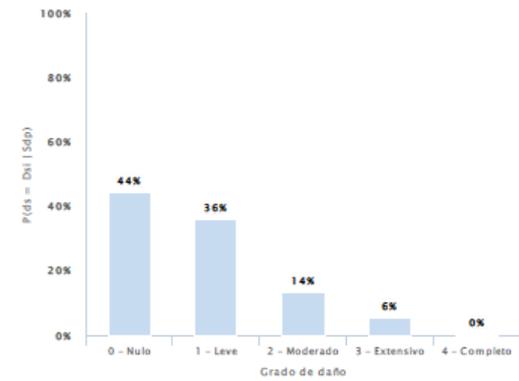
— Espectro de demanda ● Espectro de capacidad perfectamente plástico
 - - Espectro de demanda reducido ◆ Punto de comportamiento

Evaluación del daño y de la seguridad sísmica

Curvas de fragilidad



Matriz de probabilidad de daño



Evaluación de la seguridad

Índices	
Grado de daño medio [0-4]	0,8
Índice de pérdida (%)	24,0
Índice de funcionalidad [0-1]	0,9
Tiempo de recuperación (días)	64

Figura 14. Ejemplo de la exportación de resultados para el período de retorno de 975 años.

Resumen

Información básica del edificio

Edificio:	Escola Mas Clarà	Coordenadas (XY):	503.454,75	4.646.201,05
Dirección:	d	Municipio:	d	
Ocupantes (personas):	2	Valor económico:	1,00 €	

Acción Sísmica

Espectro:	EC8 Tipo II	PGA_roca[Pr=475 años](g): 0,05	PGA_suelo[Pr=475 años](g): 0,07
Tipo de suelo:	B	PGA_roca[Pr=975 años](g): 0,07	PGA_suelo[Pr=975 años](g): 0,10

Comportamiento del edificio

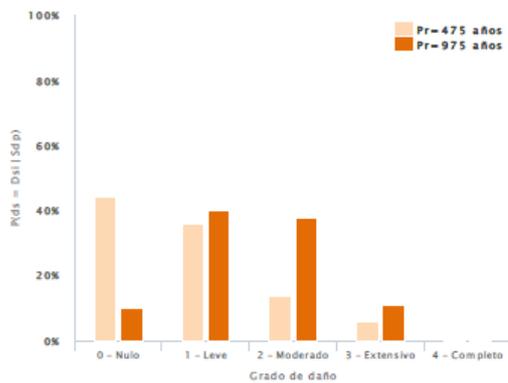
Tipología estructural: RC32L

Punto de capacidad por demanda

	Espectro de capacidad		Punto de comportamiento	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd _p (cm)	Sa _p (g)
Fluencia (γ)	0,70	0,13		
Capacidad última (u)	5,24	0,14		
			Pr=475 años	0,51
			Pr=975 años	0,70
				0,09
				0,13

Evaluación del daño

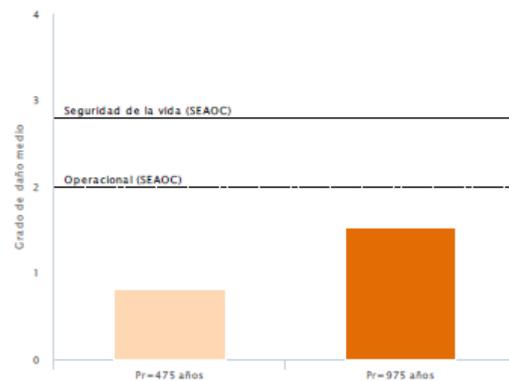
Matriz de probabilidad de daño



Pr(años)	0 - Nulo	1 - Leve	2 - Moderado	3 - Extensivo	4 - Completo
475	44%	36%	14%	6%	0%
975	10%	40%	38%	11%	1%

Evaluación de la seguridad

Pr (años)	Índices			
	Grado de daño medio [0-4]	Índice de pérdida (%)	Índice de funcionalidad [0-1]	Tiempo de recuperación (días)
475	0,8	24,0	0,9	64
975	1,5	31,1	0,5	119



El edificio evaluado cumple con el criterio Operacional para un periodo de retorno de 475 años y cumple con el criterio Seguridad de la Vida para un periodo de retorno de 975 años.

El edificio posiblemente sufra daños leves y no haya interrupción de los servicios esenciales. En general, serían necesarias algunas reparaciones menores.

Para un PR = 475 años, el índice de pérdida económica es inferior al 30% del valor de reposición del edificio. El edificio necesitaría algunas reparaciones menores económicamente aceptables.

Para un PR = 975 años, el índice de pérdida económica es inferior al 30% del valor de reposición del edificio. El edificio necesitaría algunas reparaciones menores económicamente aceptables.

Figura 15. Ejemplo de la exportación del resumen comparativo y evaluación de seguridad.

La página con los resultados para cada período de retorno (Figura 15) muestra la información utilizada para definir la acción sísmica, incluida la clase de suelo, el método de selección de la clase de suelo (sí es manual o automático) y la aceleración máxima del suelo tanto para las condiciones de la roca como del suelo. También muestra la tipología estructural seleccionada y una representación gráfica del método del espectro de capacidad, mostrando la intersección de los espectros de demanda y de capacidad para determinar el punto de rendimiento (Figura 16). Gráficos adicionales muestran las curvas de fragilidad consideradas y la distribución de probabilidad de daño obtenida.

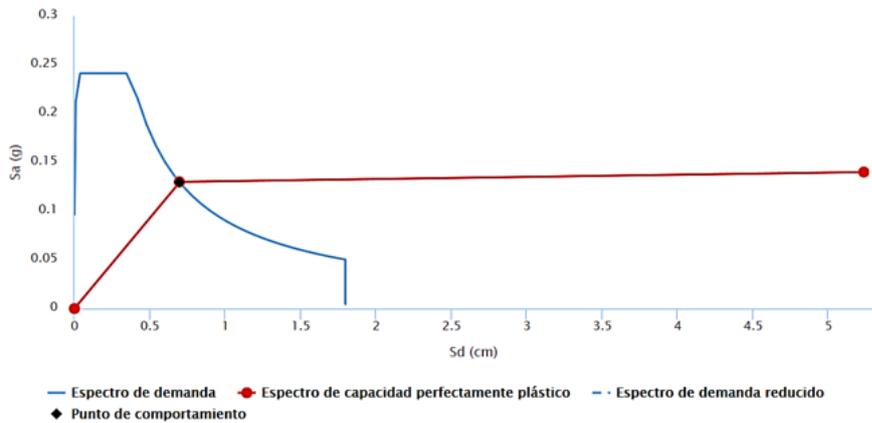
Acción Sísmica

Espectro:	EC8 Tipo II	Período de retorno (años):	975	PGA_roca(g):	0,07
Tipo de suelo:	B	Selección suelo:	Manual	PGA_suelo(g):	0,10

Comportamiento del edificio

Tipología estructural: RC32L

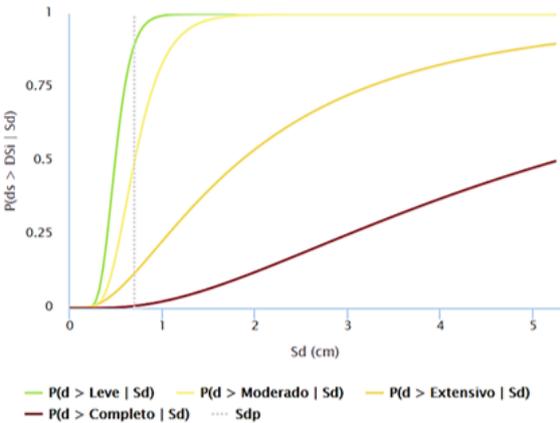
Punto de capacidad por demanda



Espectro de capacidad	
Sd _u (cm)	5,24
Sa _u (g)	0,14
Sd _y (cm)	0,70
Sa _y (g)	0,13
Punto de comportamiento	
Sd _p (cm)	0,70
Sa _p (g)	0,13

Evaluación del daño y de la seguridad sísmica

Curvas de fragilidad



Matriz de probabilidad de daño

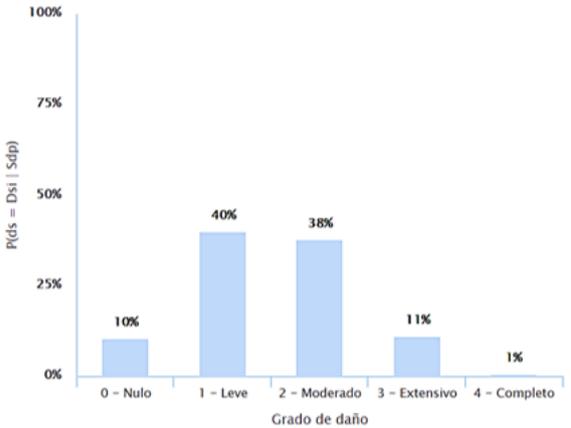
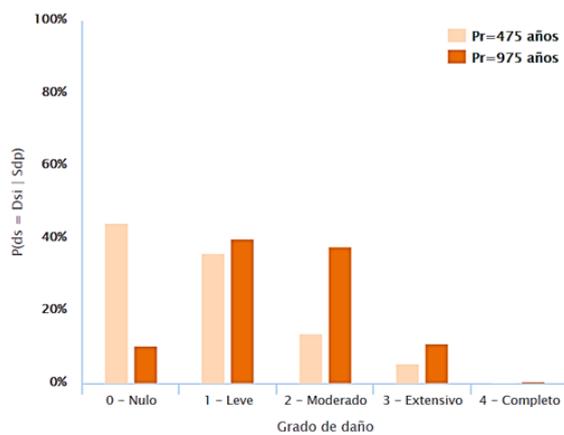


Figura 16. Ejemplo de resultados de daños esperados para un período de retorno de 975 años.

La página de resumen (Figura 14b) compara la acción sísmica, el punto de rendimiento, la distribución de probabilidad de daño, el grado de daño medio y los otros parámetros evaluados para los períodos de retorno de 475 y 975 años. La parte final de esta página muestra la evaluación de seguridad sísmica del edificio indicando si cumple con los requisitos para los niveles de comportamiento Operacional y de Seguridad de la Vida propuestos por el Comité VISION 2000. Esta evaluación se presenta en forma gráfica como se puede ver en la Figura 17. Si la barra que representa el grado de daño medio esperado para los diferentes períodos de retorno no alcanza el límite del grado de daño medio que le corresponde, entonces se espera que la estructura cumpla con los requisitos de comportamiento considerados. La herramienta ASSEE también provee los resultados en forma de texto, que se ha predefinido en función de los valores del grado de daño medio como se puede observar en la Figura 14b.

Evaluación del daño

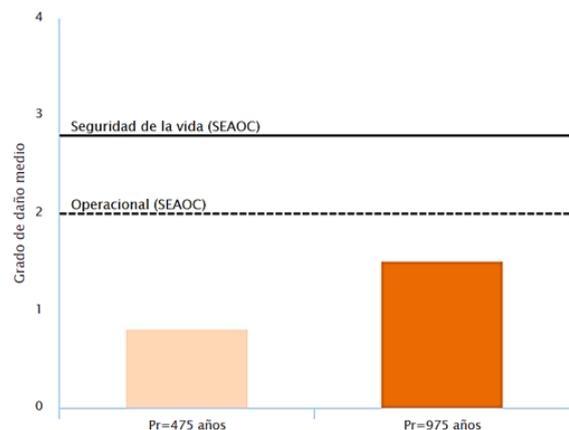
Matriz de probabilidad de daño



Pr(años)	0 - Nulo	1 - Leve	2 - Moderado	3 - Extensivo	4 - Completo
475	44%	36%	14%	6%	0%
975	10%	40%	38%	11%	1%

Evaluación de la seguridad

Índices				
Pr (años)	Grado de daño medio [0-4]	Índice de pérdida (%)	Índice de funcionalidad [0-1]	Tiempo de recuperación (días)
475	0,8	24,0	0,9	64
975	1,5	31,1	0,5	119



El edificio evaluado cumple con el criterio Operacional para un periodo de retorno de 475 años y cumple con el criterio Seguridad de la Vida para un periodo de retorno de 975 años.

El edificio posiblemente sufra daños leves y no haya interrupción de los servicios esenciales. En general, serían necesarias algunas reparaciones menores.

Para un PR = 475 años, el índice de pérdida económica es inferior al 30% del valor de reposición del edificio. El edificio necesitaría algunas reparaciones menores económicamente aceptables.

Para un PR = 975 años, el índice de pérdida económica es inferior al 30% del valor de reposición del edificio. El edificio necesitaría algunas reparaciones menores económicamente aceptables.

Figura 17. Ejemplo de comparación de resultados en la página de resumen.

4.4 Interfaz de administrador

Una interfaz de administrador permite revisar y actualizar todos los parámetros internos utilizados por ASSEE para realizar la evaluación de seguridad sísmica y, también, administrar los usuarios que pueden acceder a la herramienta web.

Los parámetros internos que se pueden actualizar, con relativa facilidad, son los siguientes: mapas de amenaza sísmica (PGA) para diferentes períodos de retorno, mapas de efectos del suelo, clases de suelo, tipologías estructurales, curvas de capacidad y fragilidad y el texto con la interpretación de los resultados numéricos de la evaluación de seguridad en función de los valores de los diferentes parámetros considerados. A parte de actualizar los datos existentes, se pueden añadir nuevas clases de suelos y tipologías, siempre que los parámetros para definirlos se ajusten a las formas matemáticas de los espectros consideradas en el programa. De esta forma, se pueden realizar las evaluaciones con la información más actualizada disponible, sin necesidad de tener que hacer una nueva versión de la herramienta.

5 EJEMPLO DE APLICACIÓN

5.1 Edificio del Instituto Santa Eugenia

El Instituto Santa Eugenia es un complejo de ocho edificios (Figura 18) ubicado en la ciudad de Girona, que se dedica a la educación pública secundaria. De este instituto se ha seleccionado el edificio esencial a ser instrumentado y analizado como parte del proyecto. Los edificios del instituto, como centro educativo, se consideran edificios de importancia especial debido a su alta concentración de ocupantes. Además, se pueden considerar edificios esenciales dado que, en los planes de emergencia municipales y regionales, el instituto podría tener asignadas tareas específicas de seguridad y refugio.



Figura 18. Complejo del Instituto Santa Eugenia en el visor GoogleMaps.

Para el análisis con la aplicación ASSEE, se consideró el mismo edificio que se seleccionó para ser instrumentado y analizado en la Acción 4. El edificio objeto de análisis, denominado como edificio 'A', está situado en la zona sur del recinto y consta de 4 niveles y una azotea accesible y transitable (Figura 19). Éste tiene una estructura de pórticos de hormigón armado, con forjados unidireccionales y cerramientos de mampostería no reforzada compuestos de ladrillo cerámico hueco. Cabe aclarar que la inspección de la estructura realizada por los equipos de UPC y ACE reveló que los edificios 'A' y 'B', que conforman una unidad arquitectónica, tienen sus estructuras separadas mediante una junta de dilatación ,cuyo

detalle se puede apreciar en la Figura 20. La presencia de esta junta permite analizar el edificio A como si fuera un edificio independiente.



Figura 19. Edificio 'A' del Instituto Santa Eugenia en el visor GoogleMaps.



Figura 20. Detalle de la junta de dilatación que separa las estructuras de los edificios 'A' y 'B' del Instituto Santa Eugenia.

5.2 Datos de entrada

Para completar los datos de entrada necesitaremos identificar la tipología estructural del edificio y clasificar su altura según los rangos definidos en la metodología.

El edificio 'A' tiene una estructura de pórticos de hormigón armado, con forjados unidireccionales y cerramientos de mampostería no reforzada. De las tipologías estructurales disponibles en la herramienta ASSEE, la más asimilable es la RC3.1. Esta tipología representa la dirección más fuerte de la estructura del edificio 'A'. La otra dirección corresponde a una estructura de forjados con vigas planas dada la naturaleza del forjado unidireccional pero esta tipología no está actualmente contemplada en la herramienta.

Al ser un edificio de 4 plantas en rango de altura es medio o M. De esta manera se seleccionará la tipología RC3.1M para realizar el análisis.

Además, habrá que indicar el nombre del edificio y su dirección para que el programa ASSEE pueda asignarle los valores adecuados de aceleración espectral y del tipo de suelo según la mesozonación de Catalunya. Como no se tiene un estudio específico del emplazamiento del edificio que permita determinar directamente el tipo de suelo, se marcará la opción de asignarlo automáticamente (Figura 13) en función del mapa de la mesozonación.

5.3 Análisis de la seguridad sísmica del edificio

Al hacer clic en el botón 'Crear simulación' (Figura 13) se realizará el análisis de la seguridad sísmica del edificio. Los resultados se podrán ver en pantalla como se muestra en la Figura 21, donde 3 pestañas permiten consultar el resumen de la evaluación, así como el detalle de los cálculos para los periodos de retorno de 475 y 975 años.

Como se puede observar en el resumen de resultados (Figura 21). La Figura 22 y la Figura 23 muestran el detalle del análisis para los periodos de retorno de 475 y 975 años, respectivamente. Como se puede observar en ambos casos no se espera que el edificio tenga daños importantes para los periodos de retorno considerados. Esto es así porque la intersección de los espectros de capacidad y de demanda ocurre en la parte elástica lineal del espectro de capacidad por lo que se considera que la deformación experimentada por el edificio durante el evento sísmico no es permanente indicando una muy baja probabilidad de que ocurra daño estructural. Cuando los espectros se cruzan en el tramo lineal del espectro de capacidad no hace falta reducir el espectro de demanda.

Dada la distribución la probabilidad de daño, ambas centradas en el grado de daño 0, se obtiene un grado de daño medio 0 para los dos periodos de retorno considerados. De esta manera, se considera que el edificio evaluado cumple con el criterio Operacional para un periodo de retorno de 475 años y con el criterio Seguridad de la Vida para un periodo de retorno de 975 años. Puede que el edificio sufra daños no estructurales, pero se espera que éstos sean de fácil reparación para poder continuar ofreciendo sus servicios. Estos pequeños daños podrían representar el 2% del coste de reposición según el índice de pérdida económica propuesto por Valcárcel (2013) y según su estimación del tiempo de recuperación, éste sería de 1 día para el caso del periodo de retorno de 975 años.



Figura 21. Resumen de los resultados obtenidos para el Instituto Santa Eugenia de Girona.

Como se mencionó anteriormente estos resultados corresponden a la dirección más fuerte del forjado unidireccional de la estructura. La otra dirección, que corresponde a una estructura de forjados con vigas planas, no se pudo analizar, pues esta tipología no está contemplada en ASSEE. Con todo, para intentar reflejar esta diferencia en este análisis se ha decidido evaluar nuevamente la seguridad sísmica del edificio considerándolo como un pórtico irregular (RC3.2), y así, poder tener una horquilla del comportamiento que se podría esperar. Los resultados de este análisis adicional se muestran en el Anexo 1 y se discuten a continuación.

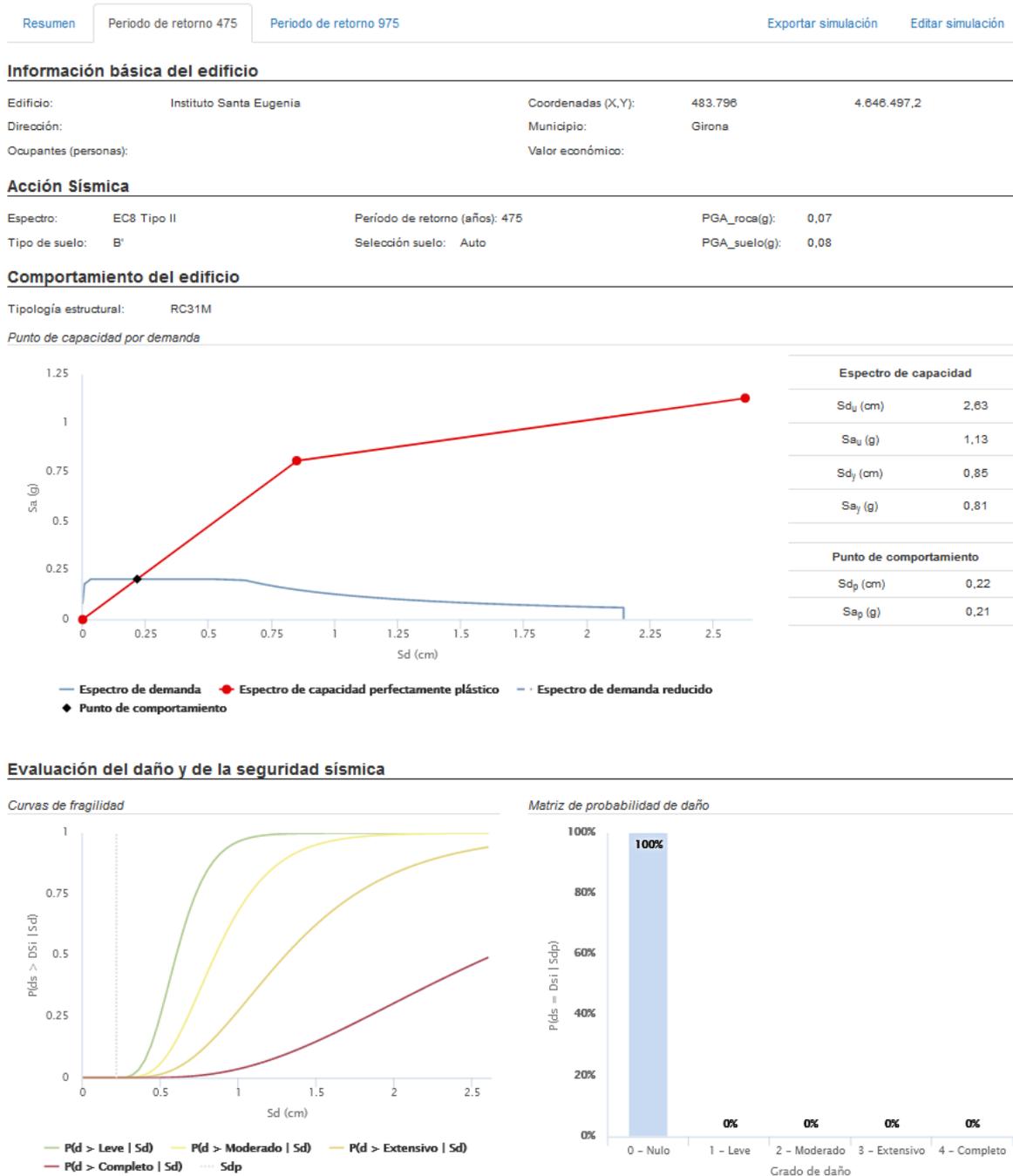


Figura 22. Resultados obtenidos para el Instituto Santa Eugenia para un periodo de retorno de 475 años.

Información básica del edificio

Edificio:	Instituto Santa Eugenia	Coordenadas (X,Y):	483.796	4.646.497,2
Dirección:		Municipio:	Girona	
Ocupantes (personas):		Valor económico:		

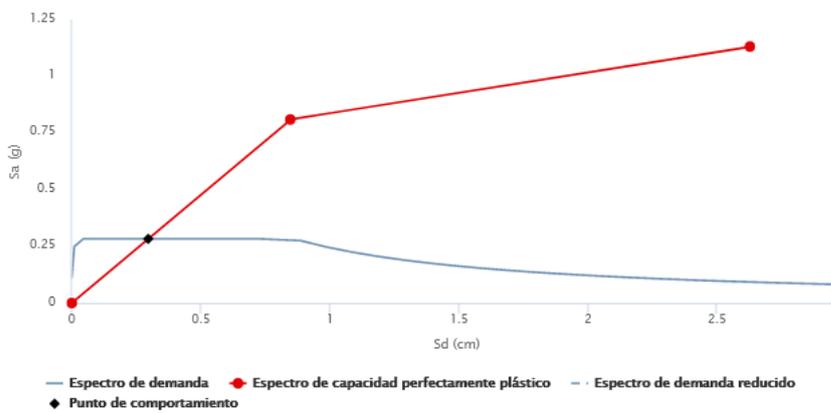
Acción Sísmica

Espectro:	EC8 Tipo II	Período de retorno (años):	975	PGA_roca(g):	0,09
Tipo de suelo:	B'	Selección suelo:	Auto	PGA_suelo(g):	0,11

Comportamiento del edificio

Tipología estructural: RC31M

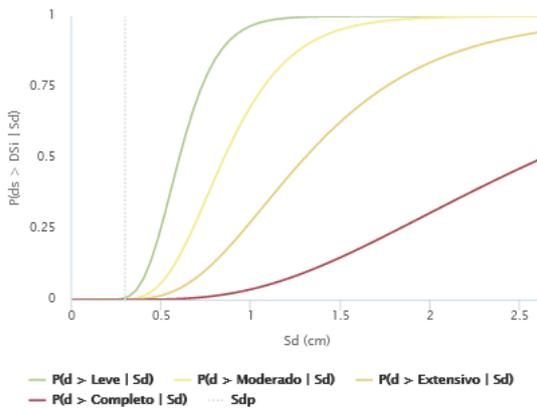
Punto de capacidad por demanda



Espectro de capacidad	
Sd _u (cm)	2,63
Sa _u (g)	1,13
Sd _y (cm)	0,85
Sa _y (g)	0,81
Punto de comportamiento	
Sd _p (cm)	0,30
Sa _p (g)	0,28

Evaluación del daño y de la seguridad sísmica

Curvas de fragilidad



Matriz de probabilidad de daño

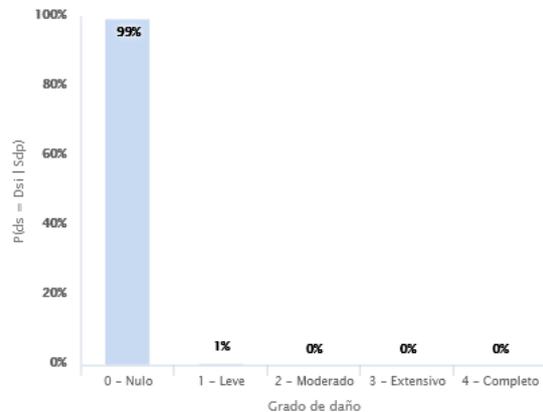
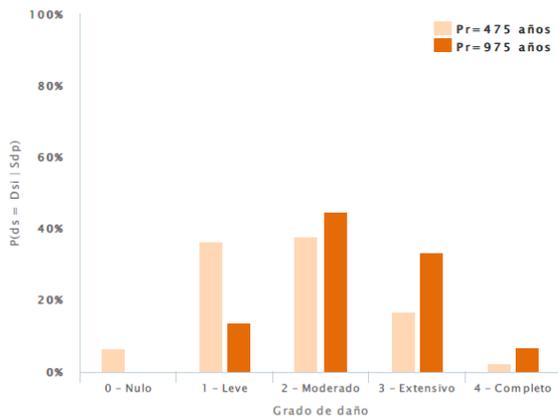


Figura 23. Resultados obtenidos para el Instituto Santa Eugenia para un periodo de retorno de 495 años.

Realizando el análisis como si el instituto fuera una estructura de pórticos irregular (RC3.2) se obtiene una distribución de la probabilidad de daño superior a la de si se considera la tipología RC3.1 (Figura 24). Para un periodo de retorno de 475 años, la distribución de la probabilidad de daño estaría centrada en los grados de daño 1 y 2 (daños leves y daños moderados), mientras que para el de 975 años se centraría en el grado de daño 2 (daños moderados). Estas distribuciones corresponden a valores del grado de daño medio de 1.7 y 2.3 respectivamente.

Evaluación del daño

Matriz de probabilidad de daño



Pr(años)	0 - Nulo	1 - Leve	2 - Moderado	3 - Extensivo	4 - Completo
475	7%	37%	38%	17%	2%
975	0%	14%	45%	34%	7%

Evaluación de la seguridad

Pr (años)	Índices			
	Grado de daño medio [0-4]	Índice de pérdida (%)	Índice de funcionalidad [0-1]	Tiempo de recuperación (días)
475	1,7	36,3	0,4	135
975	2,3	48,0	0,1	183

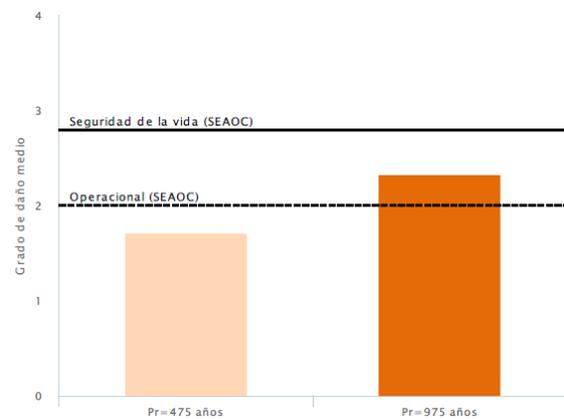


Figura 24. Evaluación del daño y la seguridad considerando una tipología RC3.2 (pórtico irregular).

Aún con este incremento del daño esperado, para la hipótesis de un edificio más débil (RC3.2 en lugar del RC3.1), la estructura cumpliría con el nivel de comportamiento Operacional para un periodo de retorno de 475 años, y con el de Seguridad de la vida para el periodo de retorno de 975 años.

Para el escenario con un periodo de retorno de 475 años, la estructura podría sufrir daños leves que no interrumpirían totalmente los servicios que esta provee. El índice de pérdida económica obtenido es del 36% del valor de reposición del edificio por lo que las reparaciones serían económicamente viables. La funcionalidad estimada para el edificio después de la ocurrencia de un evento de tal periodo de retorno es del 40% y el tiempo de recuperación sería de unos meses.

Para un periodo de retorno de 975 años, el edificio podría sufrir daños moderados pero la estructura se mantendría estable manteniendo así la seguridad de la vida. En general, las instalaciones del edificio quedarían fuera de servicio. El índice de pérdida económica sería inferior al 48% del valor de reposición del edificio, su funcionalidad residual sería del 10% y el tiempo de recuperación rondaría los 7 meses.

6 MEJORAS POR IMPLEMENTAR

6.1 Aspectos por mejorar de la metodología implementada

Durante el transcurso de las pruebas realizadas con la versión actual de la herramienta ASSEE se identificaron algunos puntos débiles en la metodología propuesta por Valcárcel (2013) que deberían ser solventados en versiones posteriores

- Para algunos casos considerados se obtienen probabilidades de daño negativas que según se ha visto es causado por las curvas de fragilidad cuando el desplazamiento del punto de rendimiento es muy bajo. Por esto será necesario revisar las curvas de fragilidad usadas y contemplar la modificación del código para impedir que se den probabilidades de daño negativas. Se ha detectado que se trata de un problema numérico de muy fácil solución y que se implementará oportunamente.
- Es necesario ampliar la matriz de tipologías estructurales consideradas. Los socios UPC, ACE, ENIT y BRGM desarrollaron la matriz de tipologías estructurales de POCRISC (Anexo 2) e identificaron tipologías adicionales a las contempladas en Risk-UE que deberán ser incluidas en la herramienta. Para hacerlo se deben asignar curvas de capacidad y de fragilidad a las mismas ya sea de las disponibles en la literatura o desarrollándolas para este fin. Algunas de estas tipologías son las siguientes:
 - Estructuras de hormigón con jácenas planas y forjados unidireccionales (RC3.3)
 - Estructuras de losas (aligeradas o macizas) sobre pilares de hormigón (RC3.4)
 - Pórticos prefabricados sin nudos rígidos (vigas simplemente apoyadas en ménsulas de los pilares) (RC7)
 - Sistemas mixtos de acero y hormigón; Vigas y/o pilares mixtos de acero y hormigón (X1)
 - Estructuras de pilares de fábrica con jácenas de acero en la planta baja y muros de fábrica en pisos (X2)
 - Estructuras con pilares de acero y forjados planos de hormigón (X3)
- Se debe realizar una revisión a fondo del índice de funcionalidad y del tiempo de recuperación propuestos por Valcárcel (2013). Se ha observado cierta inestabilidad en los valores obtenidos para estos dos parámetros. En algunas ocasiones se obtiene que el edificio estudiado cumpliría con el nivel de comportamiento Operacional, pero de forma sorprendente y sin mucho sentido físico, estos dos parámetros indican un porcentaje bajo de funcionalidad y un periodo de recuperación de varias semanas e incluso meses.

6.2 Problemas con el desarrollo de la herramienta

Luego de iniciado el proyecto POCRISC hubo un cambio de política en el ICGC que le impidió realizar la subcontratación que había sido propuesta para el desarrollo de la herramienta ASSEE utilizando los fondos concedidos por el proyecto.

Debido a este condicionante solo se ha desarrollado la versión que se ha presentado en este informe. Como se ha mostrado, esta primera versión funciona, pero también ha permitido detectar errores y elementos de mejora que deben implementarse antes de que herramienta sea puesta en producción. Por este motivo, el curso dirigido a los técnicos municipales para enseñar a utilizar la herramienta y que se había propuesto como el indicador de productividad asociado a la Acción 4, se realizará cuando se disponga de la herramienta mejorada.

A continuación, se desglosan algunos elementos de mejora a implementar:

- Modificar el código de la herramienta para que acepte datos de peligrosidad y del tipo de suelo para una zona más amplia. Actualmente tiene definida la zona de Cataluña, pero se pretendía extender la zona para cubrir toda la zona de estudio del mapa ShakeMap de POCRISC (Figura 1).
- Examinar y modificar el código de la herramienta para resolver que en algunas ocasiones se obtengan probabilidades de daño con valor negativo.
- Agregar un texto de descargo de responsabilidad (*disclaimer*, en inglés) en la página de entrada y en la de resultados de la aplicación, así como en el PDF que se descarga el usuario para guardar los resultados.
- Crear una sección de preguntas frecuentes y/o de ayuda.
- Mejorar la interfase para el registro de nuevos usuarios.

7 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una primera versión de la herramienta web, ASSEE, para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios de especial importancia. La metodología propuesta por Valcárcel (2013) para la evaluación de la seguridad sísmica implementada en esta herramienta proporciona una versión simplificada del método de espectro de capacidad que facilita su aplicación a estructuras individuales sin tener que desarrollar los modelos y análisis estructurales completamente detallados requeridos en su versión original.

Tener esta primera versión de la herramienta ha permitido realizar un sin número de pruebas con las que se han podido identificar puntos en los cuales se puede mejorar tanto el funcionamiento del programa como la metodología. Está en preparación una versión mejorada en la que se implementarán estos cambios y se extenderá su aplicabilidad a toda la región de estudio del proyecto POCRISC.

Aun así, esta primera versión de la herramienta web, ASSEE, ha permitido demostrar la utilidad y conveniencia de poder implementar, con tan solo un clic, la metodología para la evaluación de la seguridad de los edificios de especial importancia propuesta por Valcárcel (2013). De esta manera, se podrá facilitar a los técnicos municipales el uso de esta metodología sin tener que realizar todos los análisis estructurales y cálculos avanzados que la misma conlleva.

Con todo, es importante también tener en mente que la evaluación de la seguridad sísmica proporcionada por la herramienta web ASSEE representa una evaluación preliminar del riesgo sísmico de un edificio de especial importancia que puede ser de gran utilidad para fines de cribado. Aquellas estructuras que no cumplan con los niveles de comportamiento propuestos deberán entonces requerir un análisis estructural más detallado con el fin de identificar sus posibles puntos débiles y poder mejorar su rendimiento sísmico y seguridad. Por tal razón, ASSEE pretende ser una herramienta sencilla de usar, pero muy útil para los técnicos municipales a cargo de la evaluación del riesgo sísmico de los edificios de especial importancia, tan necesarias para la elaboración de los planes de acción sísmica municipal.

8 REFERENCIAS

- 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., y 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.
- Biondini, F., Toniolo, G., y Tsionis, G. (2008). Seismic design criteria for multi-storey precast structures. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Biondini, F., Toniolo, G., y 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, Universitat Politècnica de Catalunya, Dept. Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Barcelona.
- Bosch, A. (2013). Avaluació de la seguretat sísmica dels edificis d'especial importància, Tesis de Master, Universitat Politècnica de Catalunya, Dept. Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Barcelona. 312pp.
- CEN (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions amb rules for buildings, European Committee for Standardization, EN 1998-1:2004.
- Colas, B., Goula, X., Roullé, A., García, I., Buxo, P., Roviró, J., Dewez, T., y Nus, E. (2012). Shake-Map Site effect corrections, Project Sispyr Report Nº 10, Disponible en www.sispyr.eu, Consultado en Octubre 2021.
- FEMA/NIBS. (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model HAZUS® MH MR4. Technical Manual, Mitigation Division and National Institute of Building Sciences Washington, D.C, Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response.
- Freeman, S.A. (1998). The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design, 11th European Conference on Earthquake Engineering, September 6-11th 1998, Paris, A.A. Balkema, Rotterdam
- Giovinazzi, S. (2005). The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. Tesi Doctoral, Department of Civil Engineering of the Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig. Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence. 199 pp.
- Grossi, P., y Kunreuther, H., (2005) "Catastrophe modeling: a new approach to managing risk". Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- IGC y GEOTER (2008). Càlcul probabilista de la perillositat sísmica a Catalunya en acceleracions espectrals. Documento GTB/IGC/0508-001, Institut Geològic de Catalunya, Barcelona, España.
- IGC (2013). Mapa de Mesozonació sísmica de Catalunya (1:100 000), adaptat a la classificació EC8 (versió 2013), Institut Geològic de Catalunya, Barcelona, España, Report IGC-GS-001/13, 46pp.

- IGC y UPC, (2010). "Formularis per a l'avaluació de la vulnerabilitat sísmica d'edificis essencials". Informe IGC GS-11/2010.
- Irizarry, J., Bosch, A., Valcarcel, J.A., Jara, J.A., Barbat, A.H., Pujades, L.G., y Goula, X., (2014). Interactive Web-Based Software for Seismic Safety Assessment of Special Importance Buildings. Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 24-29 August, Istanbul, Turkey.
- Irizarry, J., Jara, J.A., y Goula, X., (2018). Interactive Web-Based Software for Seismic Safety Assessment of Special Importance Buildings: ASSEE. Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering, 18-21 de Junio de 2018, Tesalónica, Grecia.
- Lungu, D., Aldea, A., Arion, A., Vacareanu, R., Petrescu, F. y Cornea, T. (2001). WP1 Report European distinctive features, inventory database and typology. Risk-UE project Handbook. 58 pp.
- Martinez Solares, J.M., Cabañas, L., Benito, M.B., Rivas, A., Gaspar, J.M., Ruíz, S., y Rodríguez, O., (2017). Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012, Centro Nacional de Información Geográfica e Instituto Geográfico Nacional, Madrid, Spain, Última consulta: noviembre 2021 <http://www.ign.es/web/ign/portal/libros-digitales/peligrosidad-sismica2012>
- Milutinovic, Z. V. y Trendafiloski, G. S., (2003). WP4: Vulnerability of current buildings. Risk-UE project Handbook.
- Moreno, R. (2006). Análisis no lineal estático y dinámico para la evaluación del riesgo sísmico en. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Dept. Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Barcelona.
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P., y el equipo Risk-UE, (2004). The European Risk-UE project: and advanced approach to earthquake risk scenarios. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- NCSE-02 (2002). Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSR-02). Ministerio de Fomento. Publication date: 11-10-2002. BOE: 244-2002, pp. 35898-35966.
- SEAOC (1995). VISION 2000 – A framework for performance-based earthquake engineering. Structural Engineers Association of California, Vol. 1, January.
- SISMICAT (2003- 2014). Pla especial d'emergències sísmiques a Catalunya, 52pp. https://interior.gencat.cat/ca/arees_dactuacio/proteccio_civil/plans_de_proteccio_civil/plans_de_proteccio_civil_a_catalunya/plans-especials/sismicat/#bloc2 Última consulta en noviembre de 2021.
- SISPYR (2013). Project SISPYR: Seismic Information System for the Pyrenees, www.sispyr.eu y <https://pocrisc.eu/es/node/407>, Última consulta en noviembre 2021.
- Rossetto, T, y Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data, Engineering Structures (25), 1241–1263.
- Roussillon, P., Irizarry, J., González, M., Delmotte, P., Sedan, O., y Susagna, T., (2006). Cross-border seismic risk scenarios (Eastern Pyrenees), First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Paper Number: 902, Geneva, 2006.
- Ruiz-García, J., Terán-Gilmore, A., y 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. July 25-29, 2010, Paper No 1240. Toronto, Ontario, Canada.

Valcárcel, J.A. (2013). Análisis y gestión del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales, Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Dept. Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Barcelona. 301pp.

Wilson, J.L., Robinson, A., J., y Balendra, T., (2008). Performance of precast concrete load-bearing panel structures in regions of low to moderate seismicity. *Engineering Structures*, 30, 1831–1841.

Anexo 1. Análisis del Instituto Santa Eugenia como si fuera una tipología RC3.2

Resumen **Periodo de retorno 475** Periodo de retorno 975 [Exportar simulación](#) [Editar simulación](#)

Información básica del edificio

Edificio: Instituto Santa Eugenia - Edificio A Coordenadas (X,Y): 483.796 4.646.497,2
 Dirección: Municipio: Girona
 Ocupantes (personas): Valor económico:

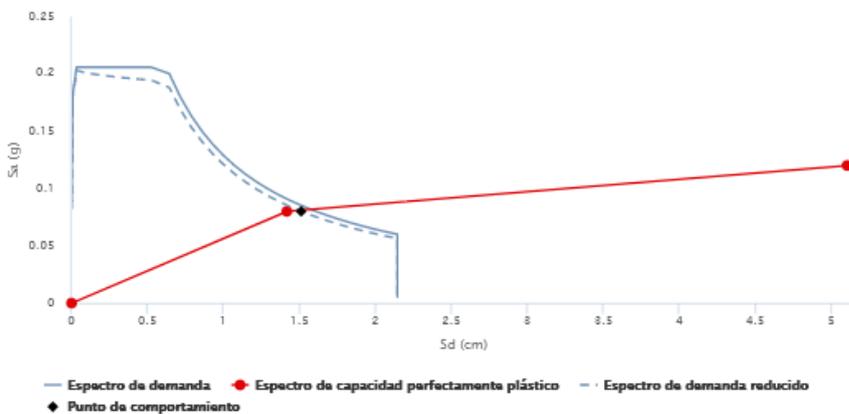
Acción Sísmica

Espectro: EC8 Tipo II Período de retorno (años): 475 PGA_roca(g): 0,07
 Tipo de suelo: B' Selección suelo: Auto PGA_suelo(g): 0,08

Comportamiento del edificio

Tipología estructural: RC32M

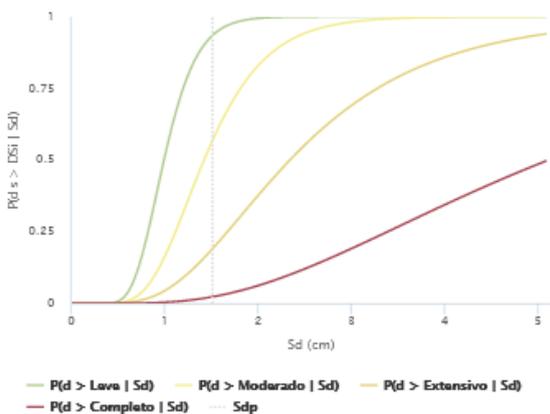
Punto de capacidad por demanda



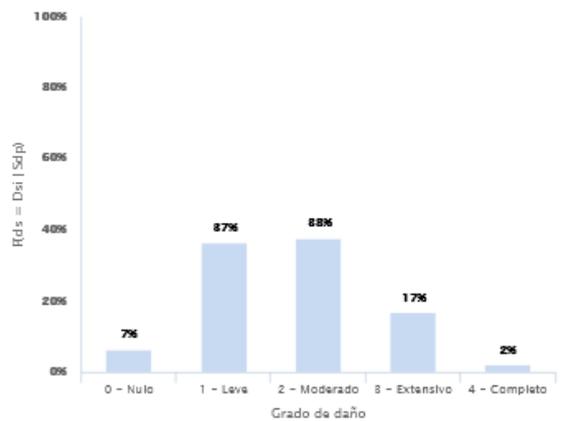
Espectro de capacidad	
Sd _u (cm)	5,11
Sa _u (g)	0,12
Sd _y (cm)	1,42
Sa _y (g)	0,08
Punto de comportamiento	
Sd _p (cm)	1,51
Sa _p (g)	0,08

Evaluación del daño y de la seguridad sísmica

Curvas de fragilidad



Matriz de probabilidad de daño



Evaluación de la seguridad

Índices	
Grado de daño medio [0-4]	1,7
Índice de pérdida (%)	38,3
Índice de funcionalidad [0-1]	0,4
Tiempo de recuperación (días)	135

Información básica del edificio

Edificio:	Instituto Santa Eugenia - Edificio A	Coordenadas (X,Y):	483.796	4.646.497,2
Dirección:		Municipio:	Girona	
Ocupantes (personas):		Valor económico:		

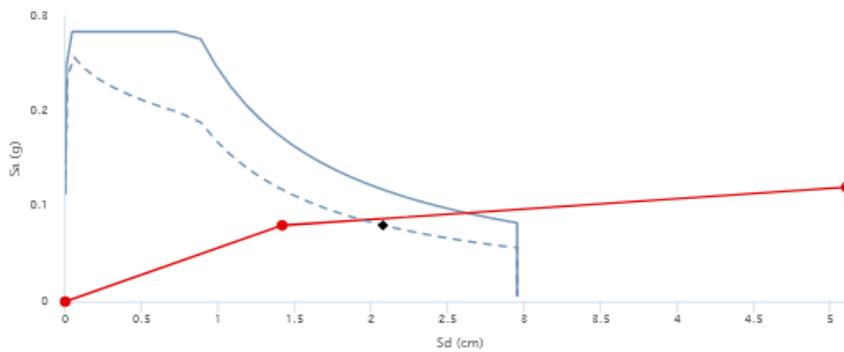
Acción Sísmica

Espectro:	EC8 Tipo II	Período de retorno (años):	975	PGA_roca(g):	0,09
Tipo de suelo:	B'	Selección suelo:	Auto	PGA_suelo(g):	0,11

Comportamiento del edificio

Tipología estructural: RC32M

Punto de capacidad por demanda



— Espectro de demanda ● Espectro de capacidad perfectamente plástico - - - Espectro de demanda reducido
◆ Punto de comportamiento

Espectro de capacidad

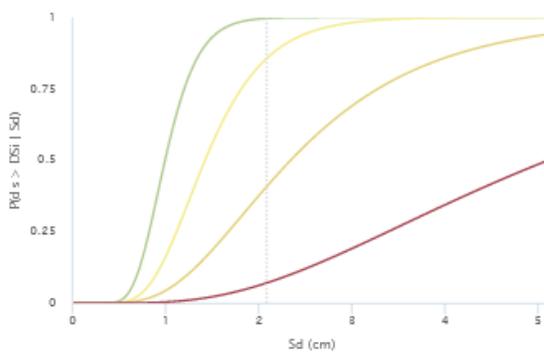
Sd _u (cm)	5,11
Sa _u (g)	0,12
Sd _y (cm)	1,42
Sa _y (g)	0,08

Punto de comportamiento

Sd _p (cm)	2,08
Sa _p (g)	0,08

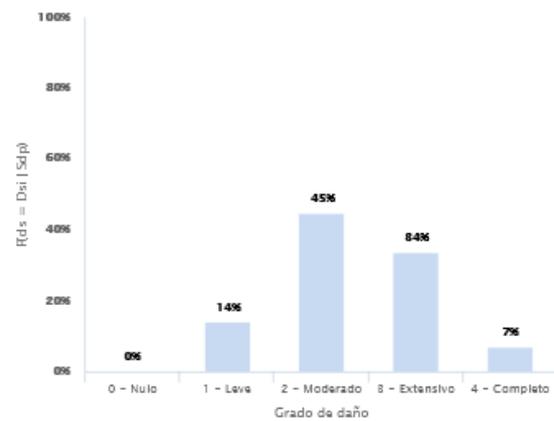
Evaluación del daño y de la seguridad sísmica

Curvas de fragilidad



— P(d > Leve | Sd) — P(d > Moderado | Sd) — P(d > Extensivo | Sd)
— P(d > Completo | Sd) ··· Sdp

Matriz de probabilidad de daño



Evaluación de la seguridad

Índices	
Grado de daño medio [0-4]	2,3
Índice de pérdida (%)	48,0
Índice de funcionalidad [0-1]	0,1
Tiempo de recuperación (días)	183

Información básica del edificio

Edificio:	Instituto Santa Eugenia - Edificio A	Coordenadas (X,Y):	483.798	4.646.497,2
Dirección:		Municipio:	Girona	
Ocupantes (personas):		Valor económico:		

Acción Sísmica

Espectro:	EC8 Tipo II	PGA_roca[Pr=475 años](g): 0,07	PGA_suelo[Pr=475 años](g): 0,08
Tipo de suelo:	B'	PGA_roca[Pr=975 años](g): 0,09	PGA_suelo[Pr=975 años](g): 0,11

Comportamiento del edificio

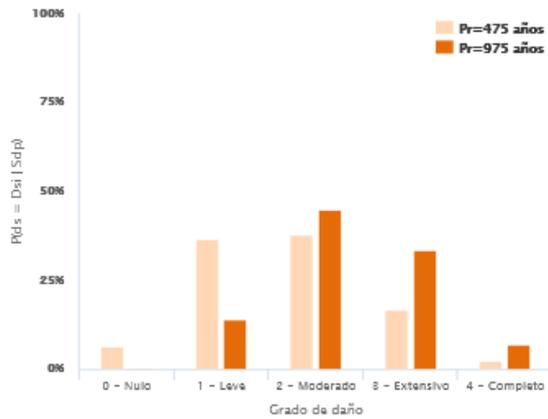
Tipología estructural: RC32M

Punto de capacidad por demanda

	Espectro de capacidad		Punto de comportamiento		
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd _p (cm)	Sa _p (g)	
Fluencia (y)	1,42	0,08	Pr=475 años	1,51	0,08
Capacidad última (u)	5,11	0,12	Pr=975 años	2,08	0,08

Evaluación del daño

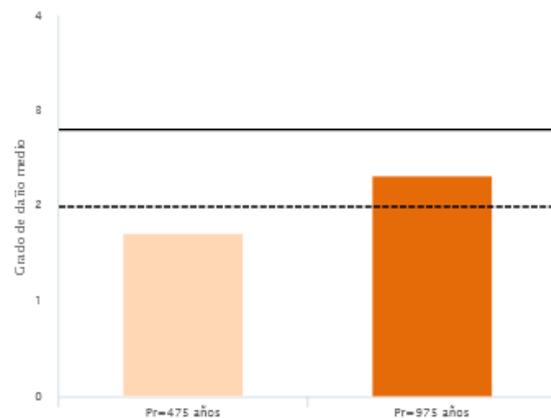
Matriz de probabilidad de daño



Pr(años)	0 - Nulo	1 - Leve	2 - Moderado	3 - Extensivo	4 - Completo
475	7%	37%	38%	17%	2%
975	0%	14%	45%	34%	7%

Evaluación de la seguridad

Pr (años)	Índices			
	Grado de daño medio [0-4]	Índice de pérdida (%)	Índice de funcionalidad [0-1]	Tiempo de recuperación (días)
475	1,7	36,3	0,4	135
975	2,3	48,0	0,1	183



Anexo 2. Matriz Tipológica de Edificios (BTM) de la zona POCRISC

Código Tipología Pocrisc	Descripción del tipo de edificio	Altura		
		Altura	Nº de plantas	Altura h (m)
M	Estructuras de mampostería			
<i>M1</i>	Muros de mampostería:			
1.0	En seco	Baja	1 - 2	$h \leq 6$
1.1	Ordinaria	Baja Media	1 - 2 3 - 5	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$
1.2	Careada	Baja Media	1 - 2 3 - 5	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$
1.3	De sillares	Alta	6+	$h > 15$
		Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
<i>M2</i>	Tierra amasada	Baja	1-2	$h \leq 6$
<i>M3</i>	De ladrillo o bloque sin armar con:			
3.1	Forjados de madera	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
3.2	Bóvedas de fábrica	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
3.3	Viguetas de acero y bovedillas ladrillo	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
3.4	Forjados de hormigón armado	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
<i>M4</i>	Muros de fábrica armada o confinada	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
<i>M5</i>	Muros de fábrica reforzados globalmente	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$

Código Tipología Pocrisc	Descripción del tipo de edificio	Altura		
		Altura	Nº de plantas	Altura h (m)
RC	Estructuras de hormigón			
<i>RC1</i>	Pórticos resistentes a momento	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
<i>RC2</i>	Muros estructurales (de cortante)	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
<i>RC3</i>	Pórticos de hormigón con relleno de fábrica sin armar			
3.1	Pórticos regulares	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
3.2	Pórticos irregulares (p.e., estructura irregular, rellenos irregulares, piso débil)	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
3.3	Pórticos con jácenas planas y forjados unidireccionales	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
3.4	Losas (aligeradas o macizas) sobre pilares de hormigón	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
<i>RC4</i>	Sistemas duales de hormigón armado (pórticos y muros)	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
<i>RC5</i>	Muros prefabricados con forjados prefabricados	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
<i>RC6</i>	Pórticos prefabricados arriostrados por muros de cortante	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
<i>RC7</i>	Pórticos prefabricados sin nudos rígidos y sin arriostrar	Baja Media	1 - 2 3 - 5	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$

Código Tipología Pocrisc	Descripción del tipo de edificio	Altura		
		Altura	Nº de plantas	Altura h (m)
S	Estructuras de acero			
S1	Pórticos resistentes a momento	Baja Media Alta	1 – 3 4 – 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
S2	Pórticos arriostrados	Baja Media Alta	1 – 3 4 – 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
S3	Pórticos con rellenos de fábrica sin armar	Baja Media Alta	1 – 3 4 – 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
S4	Pórticos arriostrados con muros de hormigón	Baja Media Alta	1 – 3 4 – 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
S5	Pórticos con cerchas o vigas celosía con luces grandes	Baja Media	1 – 2 3 – 5	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$
X	Estructuras mixtas			
X1	Sistemas mixtos de acero y hormigón	Baja Media Alta	1 – 3 4 – 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
X2	Pilares de fábrica y jácenas de acero en planta baja y de muros de fábrica en los pisos	Baja Media Alta	1 – 3 4 – 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
X3	Pilares metálicos y forjados planos de hormigón	Baja Media Alta	1 – 3 4 – 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
W	Estructuras de madera			
		Baja Media	1-2 3+	$h \leq 5.5$ $h > 5.5$