

## ESCENARIOS DE DAÑO PARA EDIFICIOS ESENCIALES Y REDES DE COMUNICACIÓN EN CERDAÑA Y ANDORRA. ASPECTOS METODOLÓGICOS Y RESULTADOS DEL PROYECTO ISARD

O. Monge<sup>(1)</sup>, J. Irizarry<sup>(2)</sup>, M. Gonzalez<sup>(3)</sup>, N. Taillefer<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>*Geoter International (GEOTER)*

<sup>(2)</sup>*Institut Geològic de Catalunya (IGC)*

<sup>(3)</sup>*Centre d'estudis de la neu i de la muntanya d'Andorra (CENMA-IEA)*

<sup>(4)</sup>*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)*

[olivier.monge@geoter.fr](mailto:olivier.monge@geoter.fr)

### RESUMEN

La realización de escenarios de daño para edificios esenciales y redes de comunicación es uno de los objetivos del proyecto ISARD. Las dos zonas piloto escogidas son el valle transfronterizo de la Cerdaña en el Pirineo Oriental y la zona urbana del Principado de Andorra. Se tienen en cuenta dos escenarios sísmicos: uno determinista (basado en el terremoto de 1428) y otro probabilista (mapa de riesgo) para un período de retorno de 475 años.

Para las redes de comunicación (carretera y tren) el inventario de movimientos en masa iniciado en la Cerdaña y el mapa geomorfológico de Andorra han permitido apreciar la sensibilidad de las infraestructuras a estos fenómenos. Se han propuesto matrices de disfunción, asociadas a las clases de vulnerabilidad de los distintos segmentos establecidos.

Respecto a los edificios esenciales se han aplicado dos métodos distintos. Uno en términos de Intensidad macrosísmica (nivel 1) y otro en términos de espectros de demanda (ADRS, nivel 2). Con la aproximación de nivel 1, se analizan unos 40 edificios. Cada edificio está caracterizado por un índice y una clase de vulnerabilidad, permitiendo la estimación del grado de daño medio esperado.

La aproximación de nivel 2, aplicado a 5 edificios, consiste en atribuir a cada edificio una curva de capacidad mediante análisis numérico con un método de tipo "push-over". El punto de desempeño de la estructura se obtiene por la intersección de la curva de capacidad con el espectro de demanda reducido. En general, la vulnerabilidad parece ser más elevada en la Cerdaña española que en Andorra y menor en la parte francesa de la Cerdaña.

### SUMMARY

One of the goals of ISARD project is to perform earthquake risk scenarios, dedicated to strategic buildings and transportation lifelines. There are two pilot zones: the cross border valley of Cerdagne and the urban zone of the principality of Andorra. Two seismic demands are considered: a deterministic scenario, (based on the earthquake of 1428) and a probabilistic assessment with a return period of 475 years.

For transportation lifelines (roadways and railways), the mass movement census started in Cerdagne and the geomorphologic map of Andorra have allowed to realize the exposition to these phenomena. Vulnerability models and dysfunction matrices are proposed in association to the vulnerability classes to different segments of transportation lifelines.

Related to strategic buildings, two different approaches are applied. The first approach is based on macroseismic intensity (level 1) and the second on the demand spectra (ADRS, level 2). More than 40 buildings are analyzed with the Level 1 approach. Each building is characterized by vulnerability index and class, allowing to estimate the expected mean damage grade.

The Level 2 approach, applied to 5 buildings, consists in assessing the capacity curve of each building, thanks to numerical calculation with a push-over method. Then, the performance point of the building is deduced from intersection between capacity spectra and reduced demand spectrum. Generally speaking, seismic vulnerability seems higher in Spanish Cerdagne than in Andorra and lower in French Cerdagne.

## Introducción y objetivos

El proyecto ISARD, Información Sísmica Automática Regional de Daños, cubre varios aspectos:

- Unificación de la peligrosidad sísmica en la región fronteriza franco-española (Módulo 1), para determinar movimientos sísmicos realistas y coherentes para la realización de escenarios de riesgo (Modulo 2);
- Evaluación del riesgo sísmico (Módulo 2) para las dos zonas piloto (centro urbano del Principado de Andorra y valle de la Cerdaña) sobre la base de dos escenarios de peligrosidad: uno determinista con las características del terremoto de 1428 y otro probabilista asociado a un periodo de retorno de 475 años.
- Desarrollo de un sistema automático de información sísmica que permita la difusión rápida de una estimación de daños producidos por un terremoto a los servicios de socorro y de gestión de crisis (Protección Civil) (Módulo 3).
- Difusión y valorización de los resultados del proyecto (Módulo 4).

Dentro del marco de difusión de resultados, este artículo tiene por objetivo el tener en cuenta los escenarios de riesgo (Módulo 2) aplicados a las redes de comunicación y a edificios estratégicos de las dos zonas piloto: el valle transfronterizo de la Cerdaña en el Pirineo Oriental y la zona urbana del Principado de Andorra (Figura 1).



Figura 1. Zona piloto del proyecto ISARD.

## Métodos propuestos y utilizados

Los métodos propuestos y utilizados son aquellos descritos en el módulo de redes de transporte y edificios estratégicos del proyecto europeo Risk-UE (Monge et al., 2003; Mouroux y Lebrun, 2006). Para los edificios estratégicos, se trata de utilizar el manual metodológico destinado a edificios corrientes (Milutinovic y Trendafiloski, 2003):

- Adoptando la aproximación de nivel 1, que consistente en evaluar un índice de vulnerabilidad ( $I_v$ ), teniendo en cuenta a la vez, la tipología de la estructura y la presencia o no de factores que influyen en su vulnerabilidad.
- Realizando la aproximación de nivel 2, mediante la modelización del espectro de capacidad del edificio para deducir su punto de desempeño, considerando el espectro en desplazamiento asociado al escenario sísmico considerado.

La aproximación de nivel 1 para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales se basa en el método del índice de vulnerabilidad y su asociación con las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 (Grünthal, 1998). El índice de vulnerabilidad permite estimar, mediante funciones de vulnerabilidad, la condición de daño que se puede esperar si los edificios se ven afectados por determinada intensidad ( $I$ ). Considerando los trabajos de la Universidad de Génova en el marco del proyecto Risk-UE, se ha inferido, a partir de los trabajos de Giovinazzi y Lagomarsino (2004) y Giovinazzi (2005), una relación de equivalencia (Figura 2) entre las clases de vulnerabilidad y los índices de vulnerabilidad ( $V_I$ ).

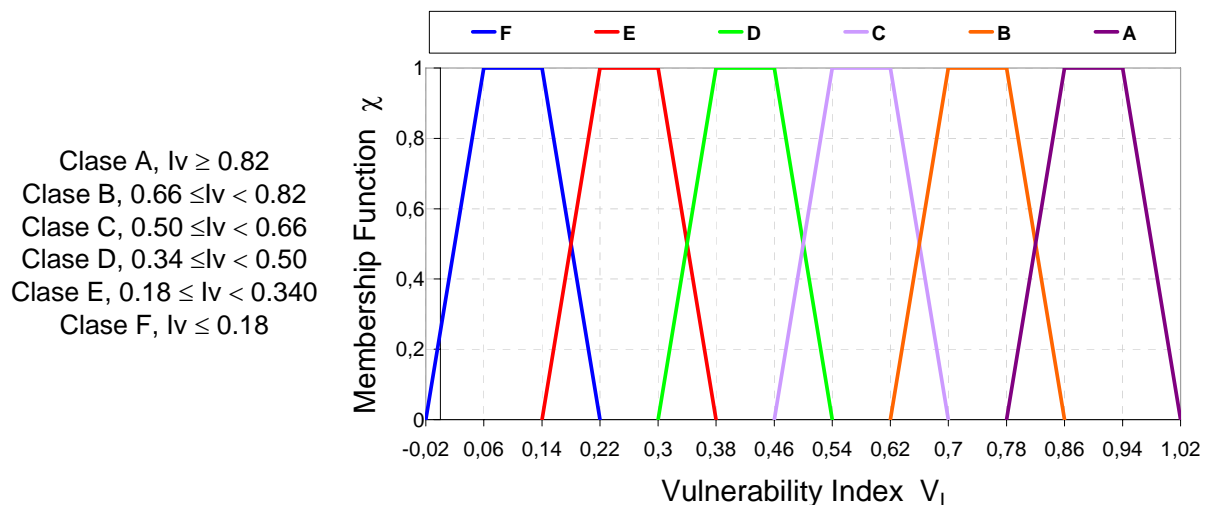


Figura 2. Equivalencia entre las clases de vulnerabilidad y los índices de vulnerabilidad (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004; Giovinazzi, 2005).

La condición de daño que se puede esperar en un edificio se define a través del grado de daño promedio ( $\mu_D$ ), un parámetro continuo entre los 6 niveles de daños (D0 a D5) definidos por la Escala EMS-98 presentados en la Figura 3. La probabilidad de sufrir un determinado grado de daño se puede obtener aplicando al grado de daño promedio una distribución estadística. En la Figura 3 se resumen las probabilidades de daño obtenidas para diferentes valores del grado de daño promedio utilizando la distribución binomial. Tomando en consideración la probabilidad de sufrir los grados de daño 4 y 5 se pueden determinar las clases de riesgo en función de rango del grado de daño promedio que se muestran en la Tabla 1.

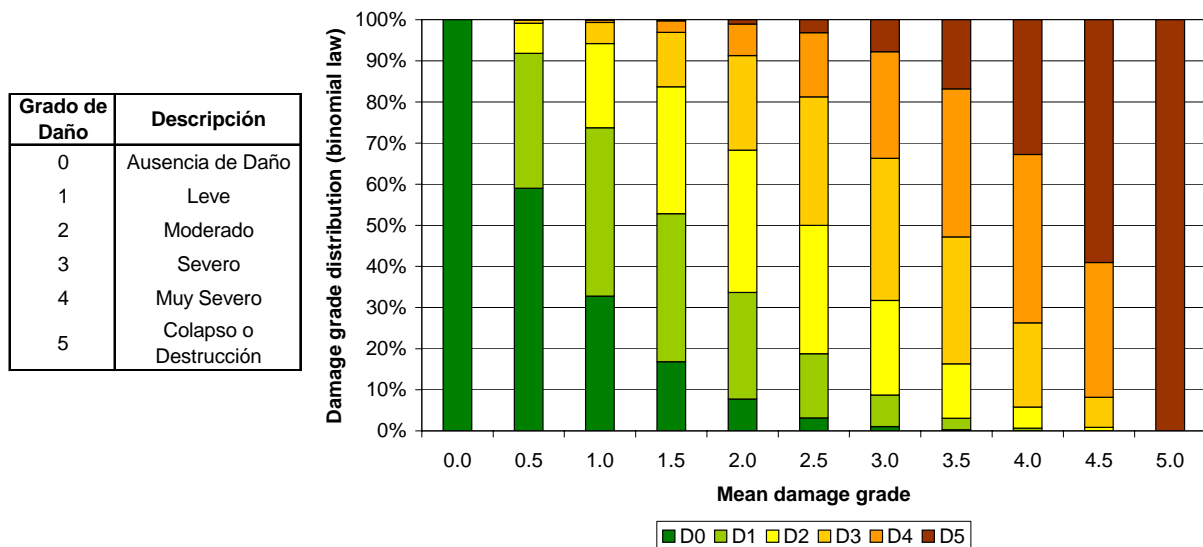


Figura 3. Descripción de la condición de daño asociada a los grados de daño y distribución de la probabilidad de daño según el grado de daño promedio.

Grado de daño medio ( $\mu_D$ )	Probabilidad de tener D4 or D5	Probabilidad de tener D5	Clase de riesgo
$\mu_D \geq 3,40$	$\geq 50\%$	$\geq 15\%$	Muy alto
$2,50 < \mu_D \leq 0,68$	20 à 50%	5 à 15%	Alto
$1,60 < \mu_D \leq 0,50$	$\leq 20\%$	$\leq 5\%$	Medio
$0,85 < \mu_D \leq 0,32$	$\leq 5\%$	Despreciable	Bajo
$\mu_D \leq 0,85$	Despreciable	Despreciable	Muy bajo

Tabla 1. Definición de las clases de riesgo de acuerdo al grado de daño medio ( $\mu_D$ ).

La evaluación de la vulnerabilidad de nivel 2 se lleva a cabo aplicando del método del espectro de capacidad (Freeman, 1998). En este método se representan conjuntamente el espectro de demanda sísmica del escenario considerado y la curva de capacidad del edificio. De esta manera se puede evaluar el punto de desempeño y conocer el desplazamiento al cual estará sometida la estructura. Entonces, el nivel de desplazamiento se puede asociar a la condición de daño que se podría esperar en la estructura dado un determinado escenario.

La curva de capacidad de los edificios esenciales seleccionados se obtiene mediante un análisis tipo “push-over” basado en un modelo detallado de la estructura. Este es un proceso que se realiza edificio por edificio por lo que ha sido solo aplicado para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales como lo son los relacionados al gobierno, policía, bomberos y escuelas. El espectro de demanda sísmica corresponde al espectro de aceleración-desplazamiento del escenario de peligrosidad sísmica a considerar.

Las redes de transporte están expuestas esencialmente a los fenómenos inducidos (desplazamientos irreversibles o cortes) y son relativamente poco sensibles a los movimientos sísmicos. Dada la existente falta de datos, se ha propuesto un método original inspirado en la filosofía y la estructuración del manual metodológico del proyecto Risk-UE.

- El análisis de las redes de comunicación, tanto, terrestres como férreas, y las discusiones con los gestores permite identificar y jerarquizar segmentos homogéneos en función de su flujo y capacidad de sustitución.
- Se propone describir las consecuencias en términos de funcionalidad de la red de transporte. (Tabla 2, Tabla 3).
- Los modelos de vulnerabilidad propuestos (Tabla 4) describen la distribución de consecuencias posibles según el nivel de movimiento sísmico.
- Los modelos propuestos para el restablecimiento del servicio se deducen de los niveles de daños (Tabla 2, Tabla 3).

Nivel de Daño	Funcionalidad	Daños Posibles	Restablecimiento
Moderado	Transporte interrumpido de forma duradera	Cortes completos de carreteras	Varias semanas (grandes reparaciones)
Débil	Transporte reducido (velocidad y/o capacidad) o interrupción transitoria	Obstrucción parcial de carreteras por movimientos de masa o caída de bloques	De algunas horas a varios días (Trabajos limitados)
Ninguno	Transporte normal	Sin daños significativos	---

Tabla 2. Daños de la red de carreteras y restablecimiento.

Nivel de Daño	Funcionalidad	Daños Posibles	Restablecimiento
Moderado	Transporte interrumpido de forma duradera	Obstrucción de las vías o desalineación importante de raíles (desplazamientos diferenciales del suelo).	De varias semanas a varios meses (substitución de tramos de vía)
Débil	Transporte reducido (velocidad y/o capacidad) o interrupción transitoria	Obstrucción parcial de las vías o desalineación de raíles (desplazamientos diferenciales del suelo).	De algunas horas a algunos días (inspecciones y reparaciones rápidas)
Ninguno	Transporte normal	Sin daños significativos.	---

Tabla 3. Daños de la red ferroviaria y restablecimiento.

### Datos considerados

Los métodos utilizados requieren el conocimiento de los datos que se resumen en la Tabla 5. Para la evaluación de la vulnerabilidad de los edificios estratégicos y las redes de transporte de las dos zonas piloto, se consideran los siguientes escenarios de peligrosidad sísmica:

- Una evaluación probabilista a 475 años de periodo de retorno, con una intensidad media de VII para toda la región;
- Un escenario determinista, basado en el terremoto de 1428 que tuvo una intensidad epicentral de IX (OLIVERA et al., 2006), que afecta la zona de estudio con una intensidad decreciente desde el epicentro en dirección oeste, de VII-VIII para la Cerdaña francesa hasta VI-VII para Andorra (Figura 4).

Vulnerabilidad	Funcionalidad	Movimiento sísmico (Intensidad)			
		VI	VII	VIII	IX
Fuerte	Transporte interrumpido de forma duradera	0,00	0,25	0,50	0,75
	Transporte reducido o interrumpido de forma transitoria	0,00	0,50	0,40	0,20
	Transporte normal	1,00	0,25	0,10	0,05
Medio	Transporte interrumpido de forma duradera	0,00	0,10	0,25	0,50
	Transporte reducido o interrumpido de forma transitoria	0,00	0,40	0,50	0,40
	Transporte normal	1,00	0,50	0,25	0,10
Débil	Transporte interrumpido de forma duradera	0,00	0,05	0,15	0,25
	Transporte reducido o interrumpido de forma transitoria	0,00	0,25	0,40	0,50
	Transporte normal	1,00	0,70	0,45	0,25

Tabla 4. Modelo de vulnerabilidad de las redes de transporte terrestre y férreas.

Temas	Edificios estratégicos		Red de transporte
	Nivel 1	Nivel 2	
Peligrosidad	Mapa local de intensidades	Espectro en desplazamiento	Mapa regional de intensidades. Inventario de movimientos de masa, y análisis de su peligrosidad.
Vulnerabilidad de los bienes expuestos	Observación visual de los edificios, Comprensión de la estructura.	Observación de los edificios, de los planos y de la estructura.	Observación y análisis global (capacidad de sustitución)

Tabla 5. Datos necesarios para evaluar la vulnerabilidad de los edificios esenciales y las redes de transporte.

El escenario sísmico determinista es más severo para la Cerdaña francesa que para la parte española y Andorra. Sin embargo, las hipótesis determinista y probabilista son bastante similares ( $VII \pm 0.5$  grados). No se han considerado escenarios más pesimistas, comparables con las exigencias de la normativa antisísmica francesa o con un periodo de retorno más elevado (por ejemplo 975 años).

Para tener en cuenta los efectos de sitio, se ha utilizado la microzonación sísmica según efectos locales realizada para el valle de la Cerdaña y la cubeta de Andorra en el marco del proyecto ISARD (Macau et al, 2006; 2007). Según esta microzonación los efectos de suelos podrían causar incrementos de intensidad que en algunos puntos del valle de la Cerdaña podrían llegar hasta 1 grado de intensidad y en la cubeta de Andorra hasta 1.5 grados.



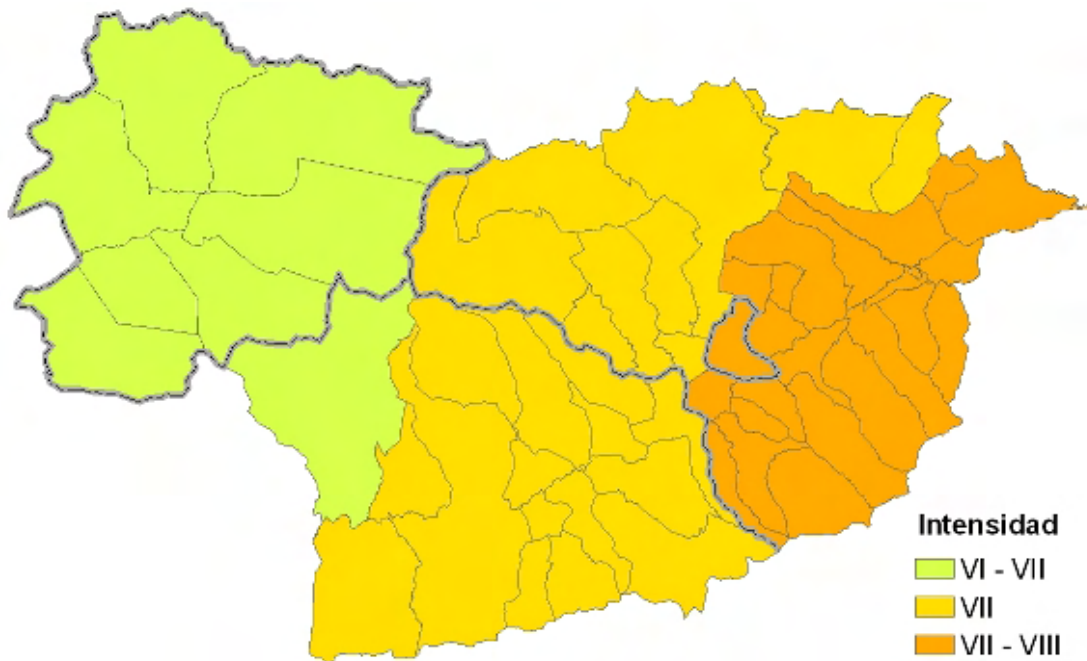


Figura 4. Escenario determinista: terremoto de 1428 (Irizarry et al., 2007)

Para las redes de comunicación que nos ocupan se han considerado solamente las consecuencias de los movimientos de masa o de caída de bloques rocosos. No se tienen en cuenta los fenómenos de licuefacción o de ruptura a lo largo de la falla. Estos efectos se han juzgado poco probables en el caso de los escenarios sísmicos considerados.

Ante la falta de mapas de movimientos de masa en las zonas piloto, se ha hecho una estimación de los movimientos potenciales a partir de los fenómenos existentes. Los datos son los siguientes:

- Para la parte francesa de la zona piloto, durante el proyecto, se ha realizado un inventario preliminar de los movimientos de masa.
- Para la parte española, algunas observaciones han sido también realizadas.
- En Andorra, el mapa geomorfológico proporcionado por CRECIT (Figura 5) constituye un buen documento de análisis. Además, se ha completado con observaciones sobre el terreno y con datos de origen geotécnico.

### Vulnerabilidad de edificios estratégicos (nivel 1)

Se han analizado más de 30 emplazamientos (correspondientes a más de 40 edificios) utilizando la aproximación de nivel 1. La Figura 6 presenta la evaluación de las clases de vulnerabilidad de los edificios estratégicos. A pesar del número limitado de edificios analizados, se observa que:

- La vulnerabilidad de la mayoría del conjunto de edificios varía de elevada (A) a media (C). Ningún edificio pertenece a las clases E o F (baja).
- La vulnerabilidad parece ser más baja en Francia, donde la mayor parte de los edificios pertenecen a la clase B.

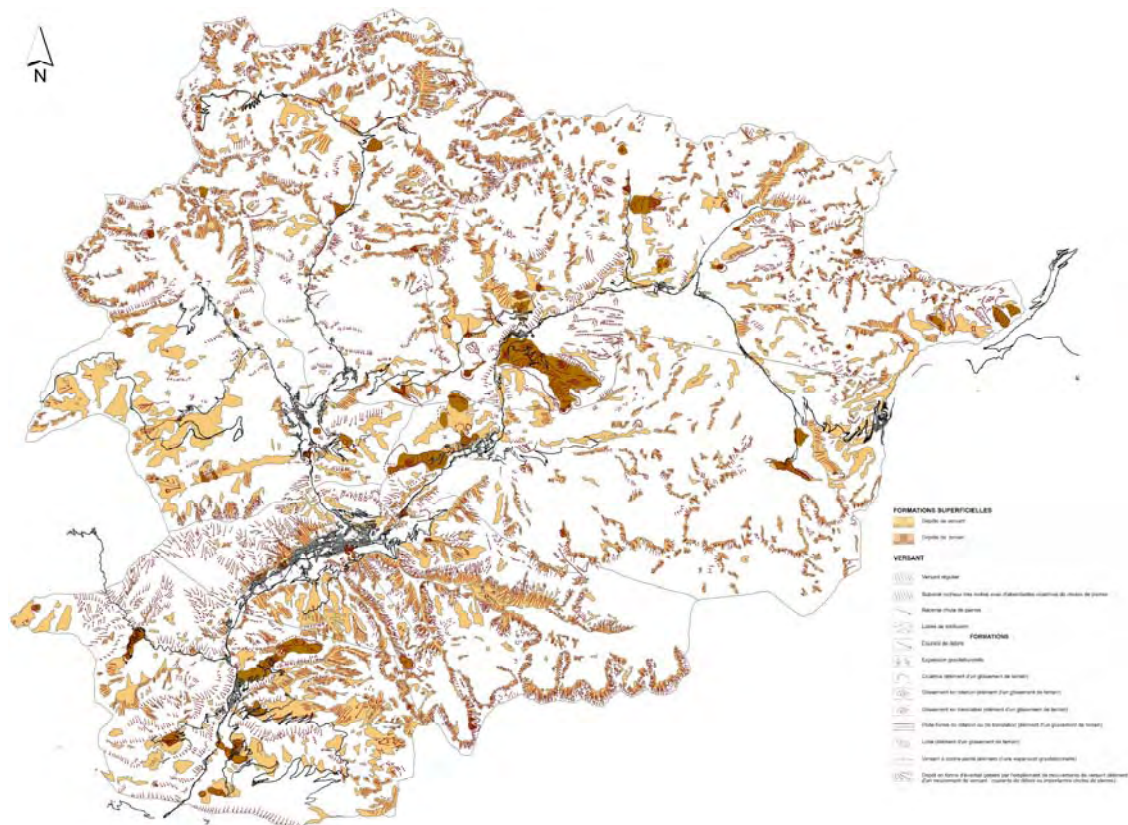


Figura 5. Información sobre movimientos de masa y caída de rocas correspondiente al mapa geomorfológico de Andorra.

- Desde un punto de vista general, los edificios de la parte española son los más vulnerables al tener una mayoría de edificios con vulnerabilidad clase A. Esta vulnerabilidad elevada no corresponde exclusivamente a edificios antiguos o construcciones de mampostería. Incluso construcciones recientes, supuestamente edificios estratégicos, como el centro de socorro de Puigcerdà se ha clasificado como vulnerable (A-B).
- En Andorra, la vulnerabilidad de los edificios estratégicos tiene un carácter intermedio, mayoritariamente de clase B, aunque con algunos edificios de clase A y C.

Considerando los escenarios probabilista y determinista de peligrosidad sísmica, se ha obtenido el grado de daño promedio esperado para los edificios esenciales estudiados. Se han calculado los valores mínimos, medios, medianos y máximos de la distribución resultante para el grado de daño promedio tanto para el conjunto, como para las regiones de la Cerdaña española, Cerdaña francesa y Andorra. Estos resultados para el escenario determinista y probabilista se muestran en la Tabla 6 y la Tabla 7, respectivamente. La clasificación del riesgo de los edificios esenciales se presenta la Figura 7.

Los grados de daño obtenidos para los dos escenarios sísmicos difieren poco. Con el escenario determinista el daño es ligeramente más elevado en la Cerdaña francesa, mientras que es ligeramente más elevado en Andorra para la evaluación probabilista. Para los dos escenarios, los resultados obtenidos para la Cerdaña española son prácticamente idénticos.



Aún a pesar de la vulnerabilidad moderada a elevada, el riesgo sísmico no es muy elevado debido al débil nivel de los escenarios sísmicos considerados:  $\mu_D$  máximo de 3.4 (fuerte a muy fuerte) y un  $\mu_D$  medio y mediano alrededor de 1.6 (débil a moderado). El riesgo sísmico es más fuerte para los edificios estratégicos de la Cerdaña española, como consecuencia de su mayor vulnerabilidad.

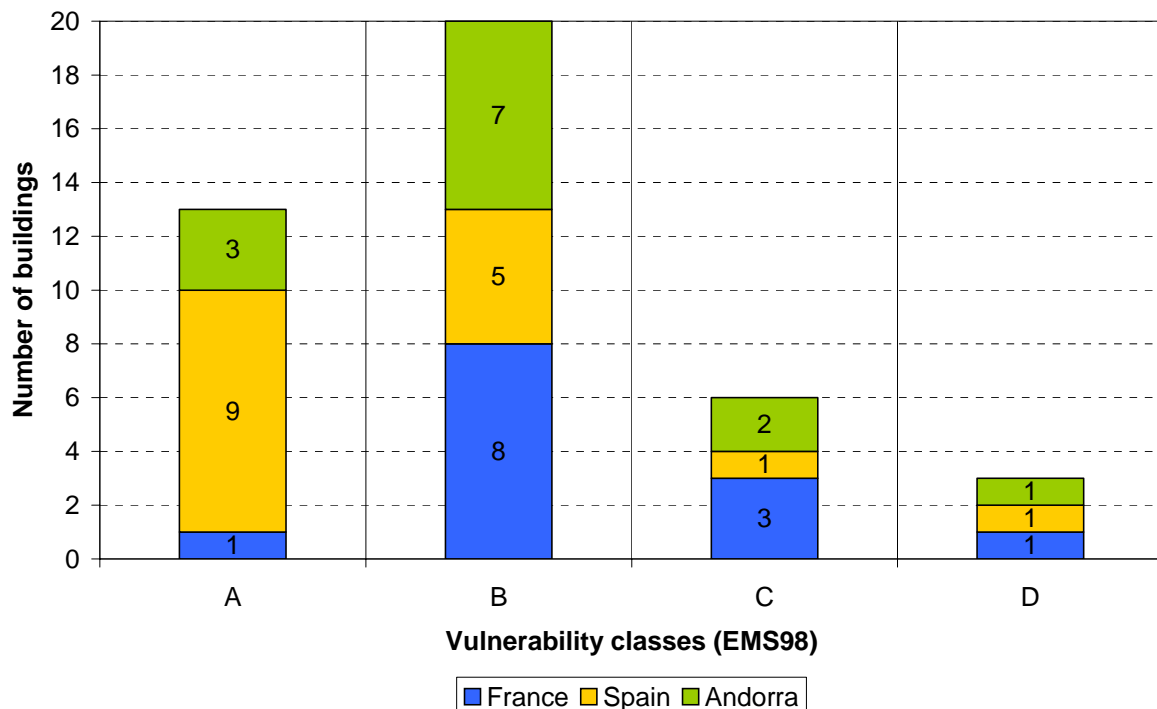


Figura 6. Repartición de los edificios estratégicos según su clase de vulnerabilidad EMS-98.

Coeficientes estadísticos	Escenario determinista			
	Cerdaña Francesa	Cerdaña Española	Andorra	Conjunto
Mínimo	0.30	0.35	0.29	<b>0.29</b>
Medio	1.55	2.06	1.23	<b>1.64</b>
Mediano	1.48	2.28	1.28	<b>1.52</b>
Máximo	2.93	3.39	2.15	<b>3.39</b>

Tabla 6. Grado de daño medio,  $\mu_D$ , de los edificios estratégicos según el escenario determinista.

Coeficientes estadísticos	Escenario probabilista			
	Cerdaña Francesa	Cerdaña Española	Andorra	Conjunto
Mínimo	0.20	0.35	0.44	<b>0.20</b>
Medio	1.19	2.03	1.63	<b>1.65</b>
Mediano	1.07	2.02	1.74	<b>1.64</b>
Máximo	2.39	3.39	2.69	<b>3.39</b>

Tabla 7. Grado de daño medio,  $\mu_D$ , de los edificios estratégicos según el escenario probabilista.

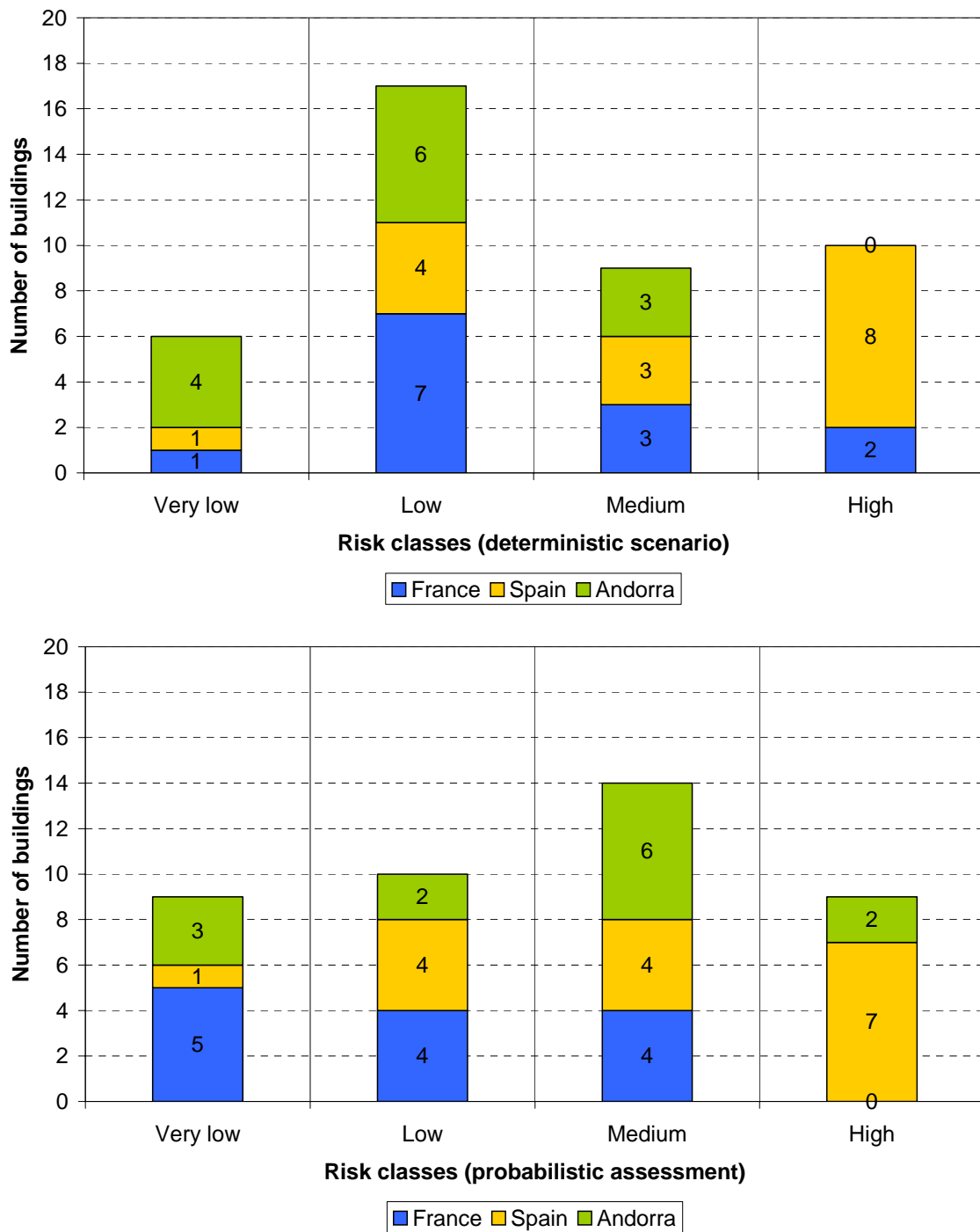


Figura 7. Clasificación del riesgo de los edificios esenciales estudiados.

### Vulnerabilidad de edificios estratégicos (nivel 2)

La aproximación de nivel 2 es más difícil de implementar debido al gran detalle de datos requeridos sobre su diseño estructural que normalmente no están disponibles, sobretodo para los edificios más antiguos. Considerando la accesibilidad de los datos, se han tratado los siguientes edificios:

- Mossos d'Esquadra de Puigcerdà ;
- Escuela de Enseñanza Secundaria Pere Borrell;
- Edificio del Gobierno de Andorra;
- Caserna de policía de Andorra ;
- Centro de socorro de Font-Romeu.

Incluso en el caso de los edificios con mayor cantidad de datos disponibles, ha sido necesario incorporar ciertas hipótesis sobre la estructura de los edificios. En estos momentos, sólo se ha podido realizar la evaluación del edificio de los Mossos d'Esquadra de Puigcerdà. Se trata de un edificio reciente (varios años) con un tipo de estructura mixta de hormigón armado en el nivel subterráneo (parking), y acero sobre la planta baja y la primera planta. El nivel subterráneo, más rígido, no se ha tenido en cuenta en los modelos de la estructura (Figura 8). Este es un edificio muy dúctil dotado de unas cargas débiles.

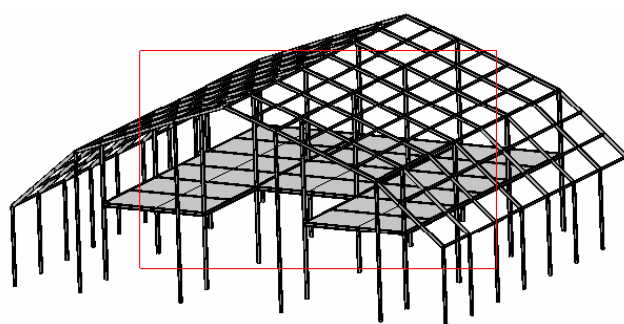


Figura 8. Mossos d'Esquadra (izquierda) y su modelo de elementos finitos (derecha).

La curva de capacidad del edificio de los Mossos d'Esquadra se ha cruzado con el espectro de demanda del Eurocódigo 8 (CEN, 2003) y el espectro de demanda local para un periodo de retorno de 475 años (Macau et al. 2007). En la Figura 9 se muestra claramente que la capacidad del edificio soporta ampliamente la demanda sísmica de los escenarios pues el cruce de los espectros se produce en la región elástica del espectro de demanda. De tal manera su comportamiento queda dentro del comportamiento elástico y no se producen daños estructurales significativos.

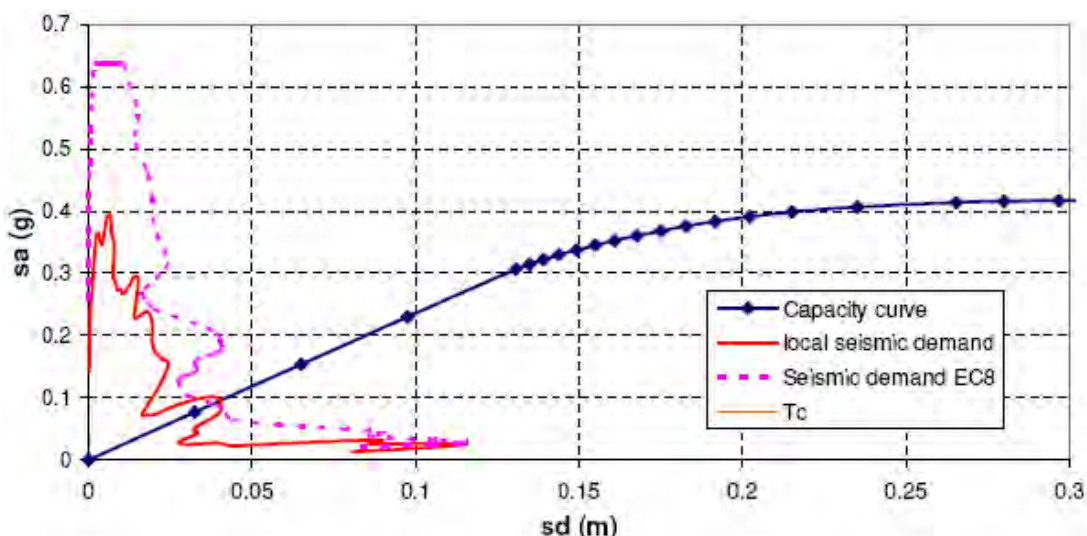


Figura 9. Curva capacidad del edificio y espectro en desplazamiento.

## Vulnerabilidad de la red de transporte

Las redes de transporte estudiadas son aquellas localizadas en territorio de las dos zonas piloto la red ferroviaria para la Cerdaña y las carreteras de Andorra y la Cerdaña. Los sistemas de transporte son sobretodo vulnerables a los efectos inducidos de los terremotos, en particular los movimientos de masa. Así, el "Tren amarillo" entre Prades y Mont-Louis ya ha descarrilado en la Cerdaña debido a caída de bloques rocosos. Estos fenómenos pueden ser desencadenados por un terremoto, pero más frecuentemente por periodos de fuertes lluvias.

Los modelos de vulnerabilidad propuestos (Tabla 4) están asociados a los diferentes segmentos de la red de transporte dependen de la exposición a los movimientos del terreno, sobretodo después de fuertes lluvias, y la capacidad de sustitución de la red de transporte. La combinación de una alta exposición a la peligrosidad sísmica y escasas posibilidades de sustitución justifican la clasificación de la vulnerabilidad como fuerte para los tres principales valles de Andorra (fuera del casco urbano) y del valle del Têt (RN116, entre Olette y Mont-Louis). Con una peligrosidad más baja y una mayor capacidad de sustitución, la vulnerabilidad de los demás valles se clasifica como media (un grado menos).

Con respecto a las vías urbanas de Andorra, se han de considerar dos aspectos. Las numerosas carreteras y diferentes tipologías de puentes constituyen, de hecho, una red de sustitución que disminuye la vulnerabilidad. Pero los escombros que se podrían asociar a los posibles daños de los edificios del centro urbano podrían causar importantes cortes en estas vías.

A falta de datos suficientes sobre los puentes y los túneles (inventarios, tipologías, patologías) se pueden hacer algunas observaciones. En España, el carácter sismorresistente de un modelo de puente reciente, considerando que es parcialmente prefabricado, no es del todo evidente. Un factor a señalar es el grado de degradación del hormigón armado de las obras más antiguas (Figura 10). También es posible que los desplazamientos de las vigas longitudinales excedan el valor admisible escapando de los apoyos (Figura 11).

Por naturaleza, las redes ferroviarias son difíciles de sustituir. Sin embargo, se observa un mayor cuidado en la concepción, realización y mantenimiento de las mismas. Esta es la razón por la cual la vulnerabilidad se ha juzgado media para los segmentos de montaña y débil en el valle de la Cerdaña.



Figura 10. Ejemplos de mal estado de conservación del hormigón.



Figura 11. Columnas sobre pórticos y soportando cargas de hormigón armado.

## Conclusiones

La aproximación de nivel 1, basada en el método del índice de vulnerabilidad, es de tipo cualitativo. Su validez recae sobre la escala macrosísmica europea (EMS-98). Este nivel de evaluación tiene la ventaja de permitir obtener resultados con un mínimo de visitas técnicas (varios edificios se pueden visitar cada día). En las zonas piloto, su utilización se justifica porque debido a la abundancia de tipos de construcciones corrientes: mampostería y estructuras de hormigón armado.

La aproximación de nivel 2 es más cuantitativa ya que se necesita una simulación de tipo “push-over” para cada edificio estudiado, pero su utilización es más compleja. En primer lugar a causa de los datos, raramente disponibles y en menor medida por los medios necesarios (tiempo de cálculo). La mejora de la precisión que aporta este método puede ser importante dependiendo de los bienes expuestos al riesgo.

De momento, sólo es posible una comparación entre los dos niveles de evaluación. Se trata de la caserna de los Mossos d'Esquadra de Puigcerdà. Según el nivel 1, una clase de vulnerabilidad D ( $V_1$  de 0,42) y una clase de riesgo débil a muy débil ( $\mu_D$  de 0,4), sugieren esencialmente una probabilidad del 95% de sufrir daños nulos o débiles. Según el nivel 2, como el comportamiento del edificio queda dentro del dominio elástico, no se esperan daños estructurales y los daños no estructurales serían poco significativos.

Esta comparación de las dos aproximaciones, aunque conducen un mismo resultado, no se trata más que de una comparación realizada con un único edificio, que además es reciente y poco vulnerable. Los trabajos en curso permitirán confirmar o desmentir la coherencia de los dos métodos.



De una forma más general, el análisis de nivel 1 parece conducir a algunas conclusiones. Sobre el conjunto de edificios estratégicos analizados, la jerarquización general de la vulnerabilidad entre Francia, Andorra y España parece significativa. A pesar de una proporción no despreciable de construcciones antiguas en masonería, el tipo de estructura, las exigencias de la normativa sismorresistente y la forma de construcción podrían explicar el mejor comportamiento general de los edificios en Francia. En ausencia de reglas sismorresistentes en Andorra, la vulnerabilidad sísmica más débil en Andorra que en España se explica probablemente por la proporción de construcciones recientes con un debido cálculo estructural. El nuevo centro para el manejo de las emergencias de Andorra parece ilustrar este dato: un comportamiento juzgado medio a pesar de la subestimación de la peligrosidad sísmica.

Una mayor colaboración entre regiones, como la ya iniciada para el futuro hospital franco-español, constituye una garantía de eficacia. Aplicada a la gestión de crisis, esta colaboración permitiría, probablemente, la aparición de centros de emergencias transfronterizos donde la resistencia de los edificios en caso de terremoto y su continuidad de funcionamiento post terremoto estarían garantizadas.

#### Referencias:

- CEN, Comité Européen de Normalisation, (2003), "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance", Doc CEN/TC250/SC8/N335, enero 2003.
- Freeman, S. A., (1998), "The capacity spectrum method as a tool for seismic design". Proceedings of the 11th Conference of Earthquake Engineering, Paris, France.
- Giovinazzi, S., (2005), "The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis", Tesis Doctoral, Technical University of Braunschweig. Alemania, 300 pp.
- Giovinazzi, S. y Lagomarsino, S. (2004), "A macroseismic method for vulnerability assessment of buildings", Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper ID 896.
- Grünthal, G. (editor) (1998), "European Macroseismic Scale 1998". *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 7, Luxembourg, 99 pp.
- Irizarry, J., Roussillon, P., González, M., Colas, B., Sedan, O., y Susagna, T., (2007), "Escenarios transfronterizos de riesgo sísmico en el Pirineo Oriental", 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona
- Macau, A., Figueras, S., Colas, B., Lebrun, B., Bitri, A., Susagna, T., Cirés, J., González, M., y Roullé, A., (2006). "Seismic microzonation in two valleys of the Eastern Pyrenees: Andorra and the Cerdanya". First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, Septiembre 2006.
- Macau, A., Figueras, S., Susagna, T., Colas, B., Le Brun, B., Bitri, A., Cirés, J., González, M., y Roullé, A., (2007), "Microzonación sísmica en el Pirineo Oriental en términos de aceleración y intensidad macrosísmica", 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.
- Milutinovic, Z. & Trendafiloski, G., (2003), "WP4 Vulnerability of current buildings. Risk-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns", Contract No. EVK4-CT-2000-00014, <http://www.risk-ue.net>, 108 pp.
- Monge, O., Alexoudi, M., y Argyroudis, S., with the coordination and collaboration of Martin C., Pitolakis K., and participation of POLIMI, (2003), "An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Vulnerability

assessment of lifelines and essential facilities (WP06): basic methodological handbook". Report n°GTR-RSK 0101-152av7, 71 pages (13 Figures., 27 Tables, 11 Appendices)

- Mouroux, P. y Lebrun, B. (2006), "RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns", In: C. S. Oliveira, A. Roca and X. Goula, (Editors), *Assessing and Managing Earthquake Risk*, pp 479 - 508, Springer.
- Olivera, C., Redondo, E., Lambert, J., Riera-Melis, A., y Roca, A., (2006). "Els terratrèmols dels segles XIV I XV a Catalunya". Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya, 407pp.

### **Agradecimientos**

Este trabajo ha estado financiado por el programa Interreg IIIA France Spain 2000-2006.