

REALIZACIÓN DE ESCENARIOS DE DAÑOS EN EL PRINCIPADO DE ANDORRA: APLICACIÓN A LA ZONA MÁS POBLADA DEL PAÍS.

M. González¹, J. Irizarry², T. Susagna², X. Goula² y Ll. Pujades³

Centre d'estudis de la neu i de la muntanya d'Andorra (CENMA-IEA), mgonzalez.cenma@iea.ad

Institut Geològic de Catalunya (IGC), jirizarry@igc.cat, tsusagna@igc.cat, xgoula@igc.cat

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), lluis.pujades@upc.edu

RESUMEN

En el marco del proyecto ISARD (Información Sísmica Automática Regional de Daños) se está realizando un estudio de riesgo sísmico, compuesto por el análisis de la peligrosidad local y la vulnerabilidad de dos zonas piloto, una de ellas la zona más poblada del Principado de Andorra. El objetivo final es la realización de escenarios de daños útiles a los organismos encargados de la gestión de la emergencia. Los resultados son útiles principalmente, antes del sismo, como herramienta para desarrollar políticas de prevención de desastres sísmicos y, después del sismo, como herramienta de gestión de la emergencia.

El cálculo de la evaluación de la peligrosidad sísmica en Andorra se ha realizado a dos escalas: una a nivel regional, integrada dentro del estudio de la peligrosidad sísmica para toda la región del Pirineo y otra a escala más local en el estudio de la microzonación sísmica de la cubeta de Andorra (área con más del 50% de la población del país).

En el análisis de la vulnerabilidad sísmica se han escogido diferentes metodologías, basadas en clases y en índices de vulnerabilidad que se han adaptado a la región. Se ha realizado un inventario de edificios adaptado a las metodologías escogidas y se ha creado una base de datos integrada en un sistema de información geográfica (SIG). En este artículo se muestran los primeros resultados de los escenarios de daños, que tienen en consideración los efectos de suelo y la vulnerabilidad de sus tipologías constructivas.

Palabras clave: Vulnerabilidad, daños, efectos de suelo, pérdidas, Pirineos, riesgo sísmico.

SUMMARY

A seismic risk study is being performed within the context of the ISARD project (Information of Seismic Automatic Regional Damages). It is composed by an analysis of the local hazard and the vulnerability of two pilot zones, being one of them, the most populated zone within the Principality of Andorra. The final aim is the accomplishment of damage scenarios useful for the organisms in charge of managing the emergency. The results are useful mainly, before the earthquake, as a tool to develop prevention policies for seismic disasters and, after the earthquake, as management tool for the emergency.

The calculation of the seismic hazard evaluation in Andorra has been performed at two scales: one at the regional level, integrated inside the study of the seismic hazard for the whole Pyrenees region, and the other at local scale in the seismic microzonation study of Andorra's basin (an area with more than 50 % of the population of the country).

Different methodologies based on classes and indexes of vulnerability have been chosen for the analysis of the seismic vulnerability adapting them to the region studied. A building inventory adapted to the chosen methodologies has been carried out a database has been created and integrated within a SIG system. This article shows the first results of the damage scenarios taking into account soil effects and the vulnerability of its constructive typologies.

Keywords: Vulnerability, damage, soil effects, losses, Pyrenees, seismic risk.

Introducción

El Principado de Andorra es un país situado en la vertiente mediterránea de los Pirineos orientales, entre España y Francia. Tiene una extensión de 468 km², aunque sólo un 15% es urbanizable y posee una población de 78.546 habitantes (Govern d'Andorra, 2006). El comercio y el turismo son las principales actividades económicas que han impulsado el desarrollo del país y son la causa del elevado incremento de población en los últimos 30 años. La gran variación temporal de la población a lo largo del año es debida a estas actividades. Andorra puede tener alrededor de 124.000 personas / día (Oliveres et. al., 2005), con una densidad de población estimada alrededor de 17 hab / edificio para Andorra la Vella y 14 hab / edificio para Escaldes-Engordany. Se han escogido para el estudio las parroquias de Andorra la Vella y Escaldes-Engordany (Figura 1) porque juntas tienen más del 50% de la población de todo el país (39.665 personas) y porque según el estudio de microzonación de la cubeta de Andorra la intensidad podría aumentar en algún punto de la zona en grado y medio.



Figura 1. Mapa de situación de la zona más poblada de Andorra.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es realizar un primer análisis de riesgo sísmico del Principado de Andorra, donde no se conocen estudios anteriores dentro de este campo. Este análisis nos permitirá evaluar el grado de pérdidas que pueden sufrir las estructuras, las personas, las infraestructuras, las actividades económicas y, en general, todos aquellos elementos sensibles a la acción sísmica.

El objetivo final es la realización de escenarios de daños útiles a los organismos encargados de la gestión de la emergencia. Los resultados tienen dos utilidades principales: sirven, antes del sismo, como herramienta para desarrollar políticas de prevención de desastres sísmicos y, después del sismo, como herramienta de gestión de la emergencia.

Desarrollo del trabajo

El trabajo se ha desarrollado en varias etapas, la primera ha sido la realización de la evaluación de la peligrosidad sísmica en Andorra a diferentes escalas y la definición de los escenarios sísmicos que se utilizarán en el cálculo de los escenarios de daños. La segunda ha sido la creación de bases de datos sobre la edificación adaptadas a las metodologías escogidas para la realización del análisis de vulnerabilidad. La tercera ha sido la realización del análisis de vulnerabilidad y por último la realización de los escenarios de daños a los edificios y a la población.

Evaluación de la peligrosidad y definición de los escenarios sísmicos

El cálculo de la evaluación de la peligrosidad sísmica en Andorra se ha realizado dentro del proyecto ISARD. Esta evaluación se ha realizado a dos escalas, una a nivel regional, integrada dentro del estudio de la peligrosidad sísmica para todo el Pirineo (Secanell et. al. 2007a; 2007b) y otra a escala local en el estudio de la microzonación sísmica de la cubeta de Andorra (Coral, H., 2002; Macau et al., 2006, 2007).

Los escenarios sísmicos informan de la aceleración o de la intensidad esperada en cada punto del territorio para un determinado período de retorno. Para Andorra se han definido tres escenarios: dos probabilistas uno con periodo de retorno de 475 y otro de 1975 años (figura 2), y uno determinista definido por un terremoto análogo al ocurrido en 1428 de intensidad epicentral IX (Olivera et al., 2006). Estos escenarios vienen expresados en intensidades y aceleraciones, y son modificados por efectos de suelo para el caso de la cubeta de Andorra.

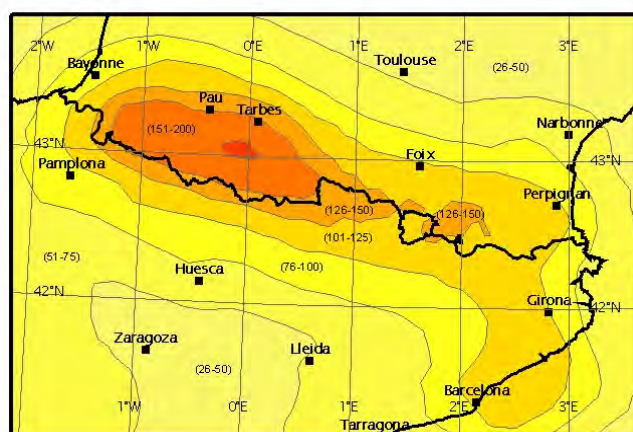
En la tabla 1 se muestran los valores de la aceleración máxima (PGA) y la intensidad calculadas, para la zona de estudio, para un suelo de referencia.

	Valor
Intensidad	
Probabilista (T= 475 años)	VII
T= 1975 años	VIII
Determinista	VI-VII
PGA	
T= 475 años	0.12 g
T= 1975 años	0.20 g

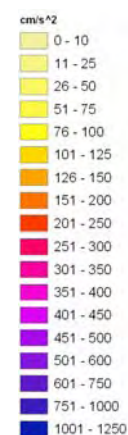
Tabla 1. Intensidad y aceleración máxima (PGA) para los escenarios considerados.

Según los resultados de Macau et al. (2006) a un 24% del área de estudio de las parroquias (un 83% respecto del área microzonada) le corresponde un aumento de intensidad que va desde un grado a grado y medio. Esta zona coincide con grandes áreas sin construir (figura 3).

(T= 475 años)



Legenda



(T= 1975 años)

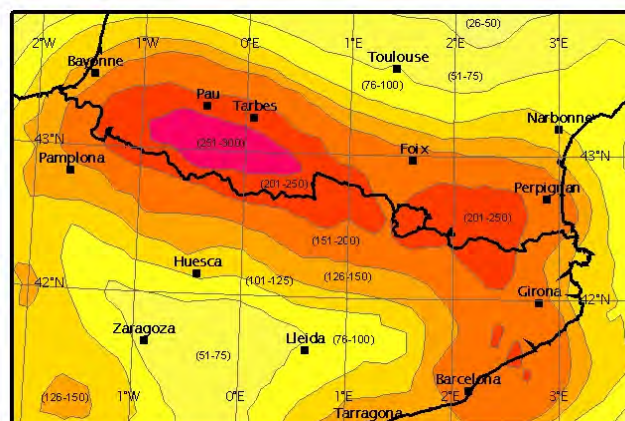


Figura 2. Mapas de peligrosidad sísmica para periodos de retorno de 475 y 1975 años respectivamente. Secanell et al. (2007a; 2007b).

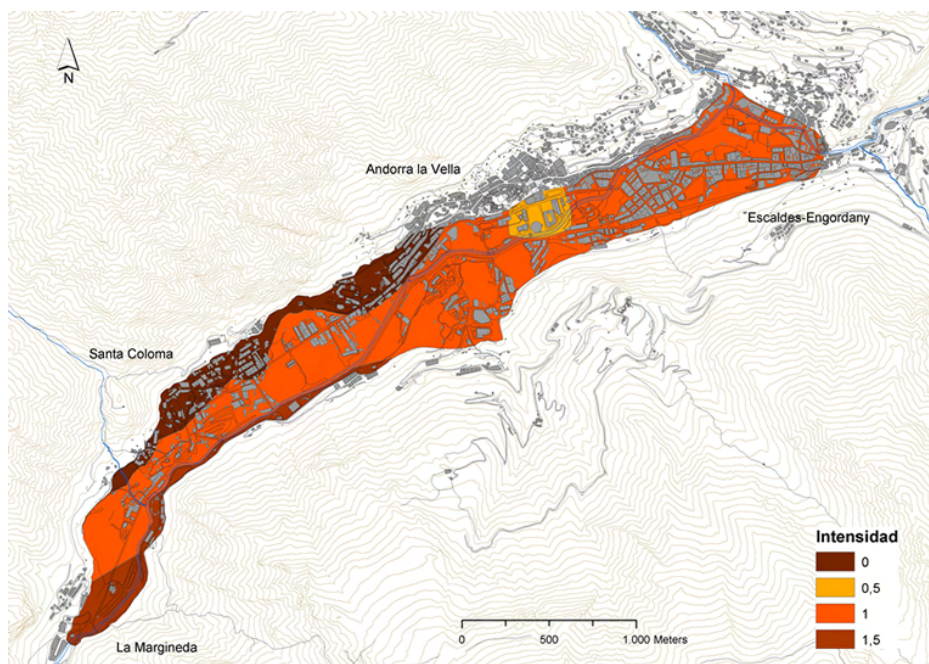


Figura 3. Microzonación sísmica de la cubeta de Andorra la Vella – Escaldes Engordany en términos del incremento de intensidad respecto al valor de un suelo de referencia (Macau et al., 2006).

Creación de base de datos para la evaluación de la vulnerabilidad

La mayoría de países tienen un organismo oficial encargado de crear y gestionar bases de datos para gestionar el parque inmobiliario y el censo a partir de: estadísticas sobre el medio ambiente, censos de población y viviendas, inmigración, consumos energéticos, etc. En Andorra, estos datos están muy dispersos y no existe (hasta la realización de este estudio) ningún organismo que haga las funciones de catastro. Los datos que hay disponibles están dispersos en los diferentes “comuns” (ayuntamientos) y a veces son inexistentes. Por tanto, la recopilación de la información necesaria para realizar el análisis de la vulnerabilidad sísmica del Principado, ha sido una tarea ardua, larga y compleja.

La información con que se ha creado la base de datos se ha extraído de diferentes fuentes: a partir de la observación de fotografías aéreas y ortofotomapas de distintos años, de datos existentes en los comuns de las parroquias (POUP, 2003), de fuentes bibliográficas: Calvo et al. (1989), Batlle (1978, 1980), Mas (1989), de reuniones con los responsables de ordenación y urbanismo de los comuns y en algunos casos a partir de visitas de campo.

La base de datos final contiene diferentes tipos de información: datos sobre edificios, líneas vitales, tipologías estructurales, usos de los edificios, población, etc. Todos los datos están integrados en un Sistema de Información Geográfico (SIG). En la figura 4 se muestra un ejemplo de la base de datos, con la distribución de los edificios por edad (según los periodos constructivos definidos en la metodología utilizada (Chávez, 1998; Roca et al. 2006).

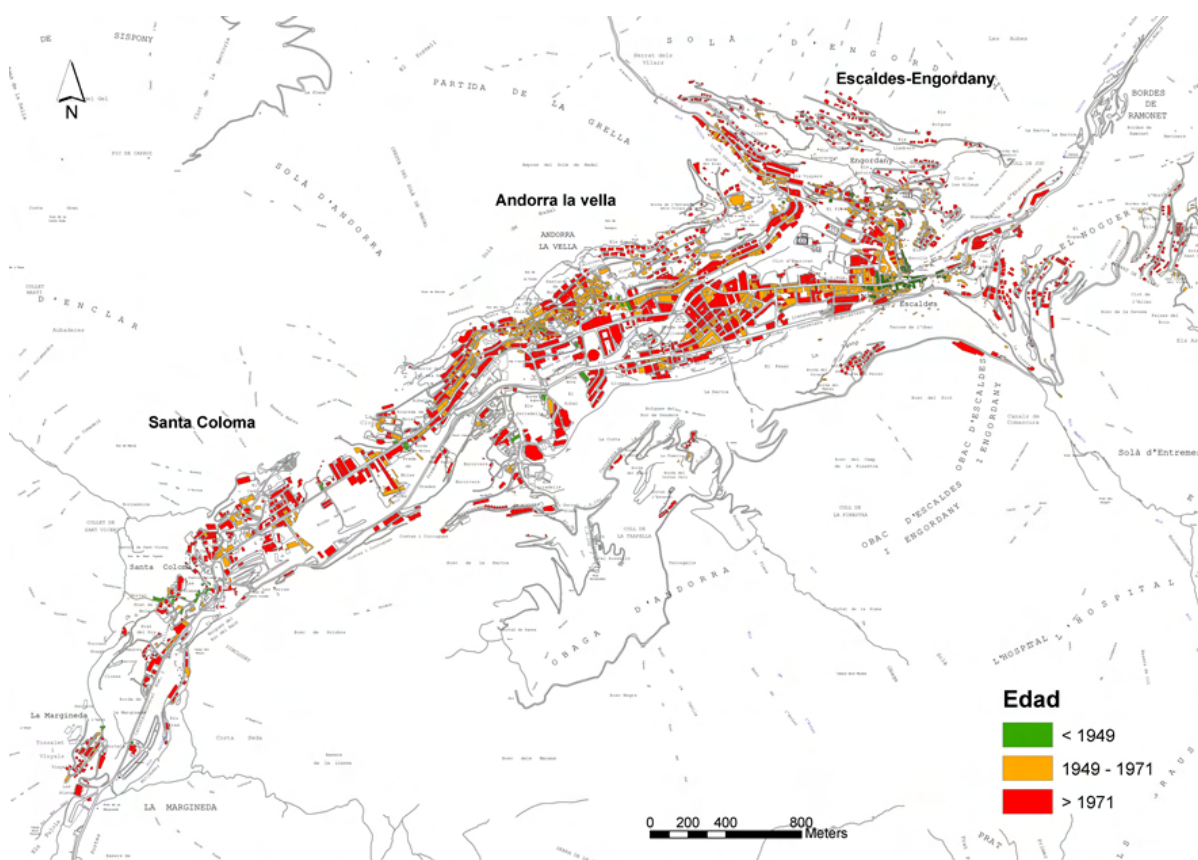


Figura 4. Distribución de los edificios por edad del edificio.

Unidades de trabajo

Se han escogido dos unidades de trabajo para representar los resultados: las parroquias (ver figura 1), para la metodología basada en clases de vulnerabilidad, y los polígonos (figura 5), para la metodología basada en índices de vulnerabilidad.

Las parroquias son una división administrativa y los polígonos son una división realizada en función de diferentes criterios: 1º por parroquias, 2º por la concentración de las edificaciones (tipo 1, concentración alta; tipo 2, concentración media; tipo 3, concentración baja), 3º por la evolución de las zonas y 4º por la situación topográfica, es decir, en zona de laderas, en el centro de la cubeta, etc. Para la zona de estudio se han definido 6 polígonos, cuatro para la parroquia de Andorra la Vella y 2 para la parroquia de Escaldes-Engordany (figura 5).

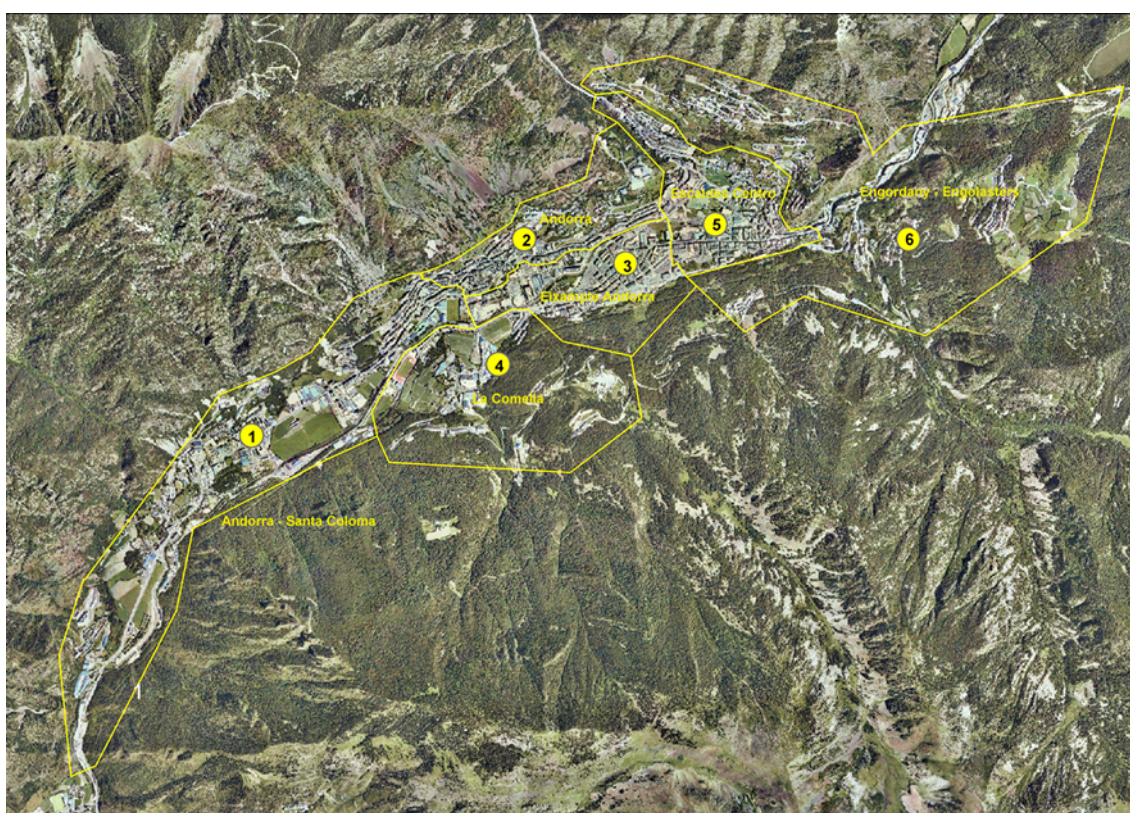


Figura 5. Polígonos para la parroquia de Andorra la Vella y Escaldes-Engordany.

Análisis de la vulnerabilidad

Se han escogido dos metodologías: una basada en clases de vulnerabilidad (Chávez, 1998; y Roca et al., 2006) y otra basada en índices de vulnerabilidad, metodología desarrollada dentro del proyecto Europeo Risk-UE (Mouroux & Lebrun, 2005) por Giovinazzi & Lagomarsino (2002).

Metodología basada en clases de vulnerabilidad

Esta metodología se ha escogido porque tiene la ventaja que al tener un enfoque estadístico requiere poca información sobre la edificación. Los resultados que se obtienen para cada parroquia (municipio), que es la unidad de trabajo, se refieren a valores globales, no

pudiéndose dar información referente a edificios individuales.

Está basada en la intensidad macrosísmica, que a pesar de ser una estimación de los efectos de los terremotos con cierto grado de subjetividad, presenta la ventaja de que se puede utilizar para realizar un análisis completo del riesgo sísmico.

Los mapas de peligrosidad sísmica que nos indican el movimiento a esperar en cada lugar, de manera determinista o bien asociado a una probabilidad, se expresan frecuentemente en intensidad macrosísmica. Las tipologías constructivas, pueden ser caracterizadas según las tipologías definidas en las escalas de intensidad (clases de vulnerabilidad A, B, C, D, E y F según la escala EMS-98 -Grünthal, 1998-) y finalmente, los daños a esperar para una cierta intensidad, pueden ser deducidos a partir de matrices de probabilidad de daños acordes a estas escalas. De esta forma es posible desarrollar escenarios con una estimación de daños físicos a las personas y de pérdidas económicas.

Esta metodología ha sido utilizada para desarrollar el plan de emergencias sísmicas para Cataluña (Susagna et al., 2006) y como herramienta para simular escenarios de daños específicos en Cataluña (RSE, 2003) y en España (Barranco & Izquierdo, 2002).

La clasificación de los edificios en clases de vulnerabilidad se realiza utilizando la misma matriz tipológica (tabla 2) que para Catalunya (Mañà, 1995; Chávez, 1998), debido a la proximidad geográfica y a que la mayoría de los técnicos del área de la construcción se han formado en España y utilizan las mismas técnicas constructivas y materiales. Las únicas modificaciones que se han realizado han sido en los límites de las edades definidas para los periodos de construcción y en las alturas. En el caso de la edad, ésta se ha extraído de fotografías aéreas de los vuelos de 1948 y 1972 (al no existir la de los años 1950 y 1970) el límite de <1950 se ha variado a <1949 y el de 1970 a 1972. En las alturas las 4 y 5 plantas no se pueden diferenciar (según POUP, 2003), por lo tanto los límites de número de plantas son de menor de 4 plantas, igual a 4-5 plantas y superior a 5 plantas.

	< 1949		1949-1971		> 1971	
	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
< 4 plantas	20% A + 80% B	30% A + 70% B	5 % A + 50% B + 45% C	15 % A + 70% B + 15% C	85% C + 15% D	5% A + 20% B + 65% C + 10% D
= 4-5 plantas	20% A + 80% B	40% A + 60% B	10% A + 60% B + 30% C	20% A + 70% B + 10% C	5% A + 20% B + 65% C + 10% D	10% A + 30% B + 55% C + 5% D
> 5 plantas	40% A + 60% B	60% A + 40% B	15 % A + 70% B + 15% C	30% A + 65% B + 5% C	8% A + 27% B + 60% C + 5% D	15% A + 45% B + 40% C

Tabla 2. Clasificación de los edificios de vivienda en clases de vulnerabilidad de acuerdo con la EMS-98, Chávez (1998), (Roca et al. (2006),

Cómo resultado se obtiene que la distribución resultante para las dos parroquias es muy parecida, siendo la clase más representativa la clase C seguida de la B (figura 6). Se observa que la parroquia de Andorra la Vella tiene un 9% de edificios con clase de vulnerabilidad A (clase más vulnerable, más propicia a sufrir daños en caso de terremoto) y un 11% para la parroquia de Escaldes-Engordany. Se puede decir que los edificios de las parroquias de Escaldes-Engordany y Andorra la Vella tienen una vulnerabilidad media-baja según Chávez (1998).

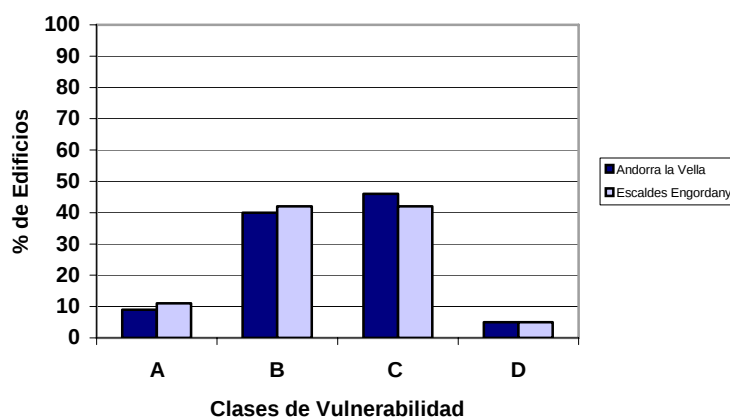


Figura 6. Comparación entre las clases de vulnerabilidad de las dos parroquias.

Metodología basada en índices de vulnerabilidad

La metodología basada en índices de vulnerabilidad es también una metodología de evaluación global de la vulnerabilidad sísmica en grandes áreas urbanas. Este método define el índice de vulnerabilidad convencional V_i , que representa la pertenencia de una estructura a una clase de vulnerabilidad determinada. Este índice tiene en cuenta factores como: edad de la construcción, número de plantas, irregularidades en planta y en altura, etc. La función de distribución de probabilidad se obtiene a partir de la distribución beta, caracterizada por un grado de daño medio μ_D . Este parámetro se calcula en función de la intensidad del movimiento I (EMS-98) y del índice de vulnerabilidad V_i . Esta metodología se ha aplicado en el proyecto Risk-UE para evaluar 7 ciudades de Europa: Barcelona (España), Bucarest (Rumania), Catania (Italia), Sofia (Bulgaria), Bitola (Yugoslavia), Thessaloniki (Grecia) y Niza (Francia) (Mouroux & Lebrun, 2006).

Para la aplicación de esta metodología se han definido las tipologías estructurales de la región en base a la clasificación propuesta por Milutinovic & Trendafiloski (2003) y su distribución dentro de los polígonos. Las tipologías representativas son las siguientes: tres tipologías con estructura de mampostería: de piedra fragmentada (M1.1); con solera de madera (M3.1) y losas de hormigón armado (M3.4); una con estructura de hormigón armado con pórticos de hormigón armado rellenos de mampostería (RC3.1) y una con estructura de acero, con pórticos de acero resistentes al momento (S1).

En la tabla 3 se presentan los índices de vulnerabilidad medios que se han utilizado en el cálculo.

Tipología		Descripción	Risk-UE	Índice de vulnerabilidad medio
Mampostería	T1	Piedra fragmentada, irregular o al natural	M 1.1	0.873
	T2	Solera de madera	M 3.1	0.740
	T3	Losas de hormigón armado	M 3.4	0.616
Hormigón armado	T4	Pórticos de hormigón armado rellenos de mampostería: Rellenos regularmente	RC 3.1	0.402
	T5	Muros de cortante de hormigón armado	RC 2	0.386
Acero	T9	Pórticos de acero resistentes al momento	S 1	0.363

Tabla 3. Principales tipologías para la zona piloto de la cubeta de Andorra con sus correspondientes índices de vulnerabilidad de Risk-UE (Mouroux & Lebrun, 2006).

Estos índices han sido variados por modificadores que hacen referencia al número de plantas, edad, plantas blandas para los edificios de mampostería y hormigón armado y nivel de normativa sismorresistente para los edificios de hormigón armado.

A modo de resumen (tabla 4) se puede decir que hasta 1930-1935 se construían casas de piedra; a partir de esta fecha el sistema de construcción cambió a estructuras de mampostería (sistema catalán) con soleras de madera; a partir de 1955-1960 se construyen edificios mixtos (muros de mampostería y losas de hormigón y cerámica), a partir de 1960-1965 estructuras de hormigón (pilares de hormigón y forjados de hormigón). En los últimos años se están construyendo edificios de muros de cortante de hormigón armado (RC2) pero sólo hay 4 ó 5 en todo el país, de momento no es una tipología que esté muy representada.

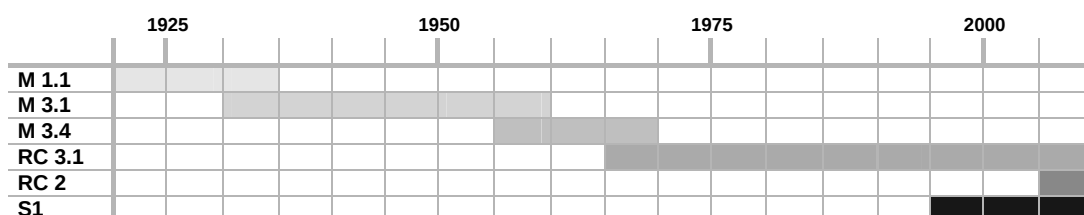


Tabla 4. Periodos de construcción de las diferentes tipologías constructivas en Andorra.

En la tabla 5 se presenta, a modo de ejemplo, la distribución de las tipologías en función de la edad, del número de plantas y del tipo de estructura para el polígono de Andorra-Santa Coloma. La asignación de los porcentajes se ha hecho a partir de campañas de campo, con la confirmación de los arquitectos de la zona (conocedores de la evolución de la construcción) para todos los polígonos.

1. Andorra – Santa Coloma			Edad		
Nº plantas	Estructura	Tipología	< 1950	1950-1970	> 1970
< 5 plantas	Mampostería	M 1.1	70		
		M 3.1	30	30	5
		M 3.4		50	5
	Hormigón armado	RC 3.1		20	80
	Acero	S1			10
5 plantas	Mampostería	M 1.1			
		M 3.1	100	30	5
		M 3.4		50	5
	Hormigón armado	RC 3.1		20	80
	Acero	S1			10
> 5 plantas	Mampostería	M 1.1			
		M 3.1	100	20	5
		M 3.4		50	5
	Hormigón armado	RC 3.1		30	80
	Acero	S1			10

Tabla 5. Porcentajes de las tipologías estructurales para el polígono 1(Andorra – Santa Coloma).

Para representar los resultados y poder compararlos con los obtenidos por el método de clases de vulnerabilidad se han considerado las relaciones entre la escala EMS-98 y los índices de vulnerabilidad (figura 7). Esta relación se ha extraído de Giovinazzi & Lagomarsino (2004) y Giovinazzi (2005). La distribución de los índices de vulnerabilidad (Iv) para cada polígono se presenta en la figura 8. Los índices de vulnerabilidad más representativos se distribuyen entre los valores 0.82-0.67 y 0.66-0.51 que corresponderían a las clases B y C.

El índice de vulnerabilidad promedio para la parroquia de Andorra la Vella es 0.6699 y para la parroquia de Escaldes-Engordany es de 0.6540.

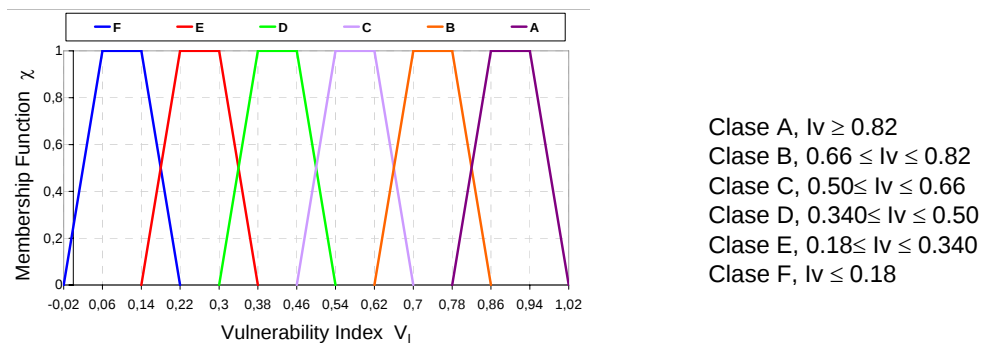


Figura 7. Relación entre clasificación EMS – 98 y los índices de vulnerabilidad.

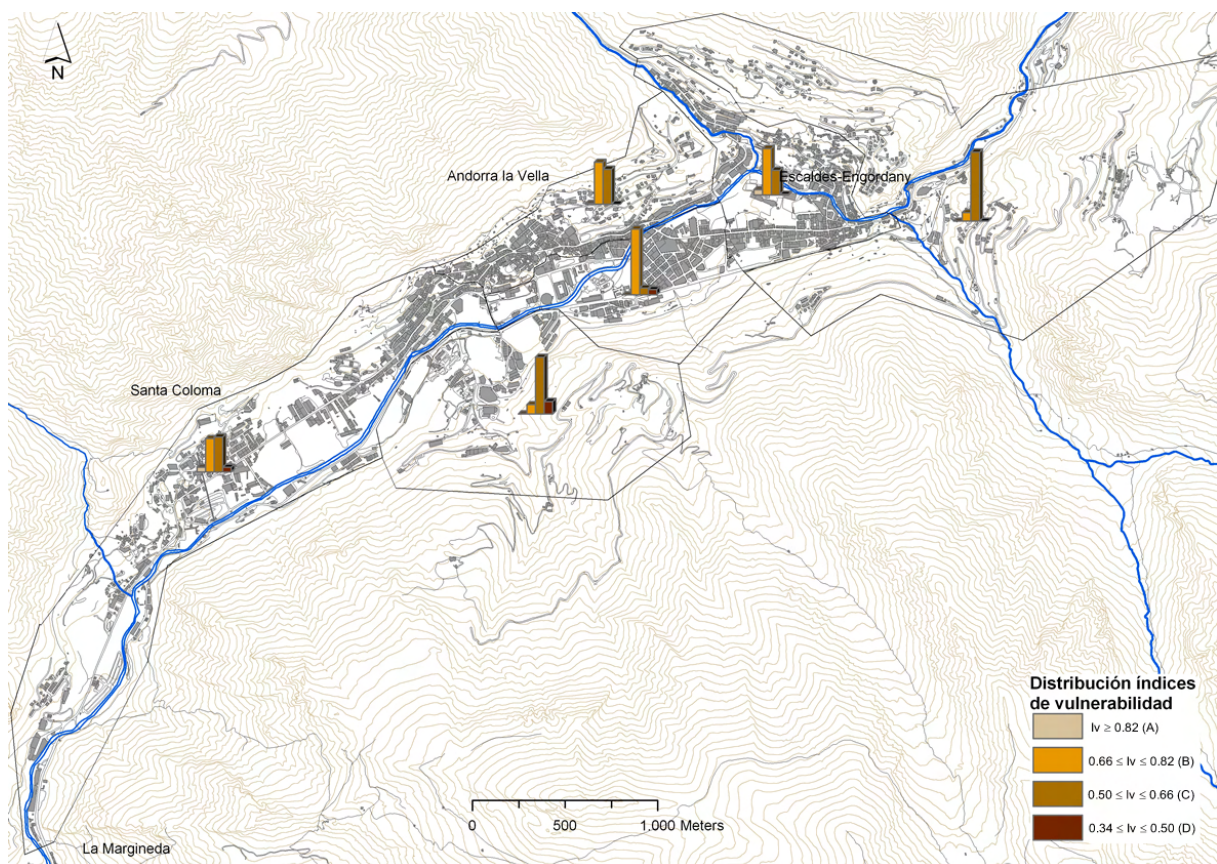


Figura 8. Distribución de los edificios según los índices de vulnerabilidad para cada polígono.

En la tabla 6 se presenta la distribución de la vulnerabilidad resultante de la aplicación de las dos metodologías utilizadas, polígono por polígono, para poder comparar las metodologías. Se puede observar que los resultados son bastante diferentes, la metodología del índice de vulnerabilidad muestra una vulnerabilidad más baja del parque de edificios. Ambas metodologías están centradas en la clase de vulnerabilidad B. Las máximas diferencias se observan con los polígonos que no tienen un casco histórico y que se han desarrollado en los últimos 30 años (polígonos de la Comella y Engordany-Engolasters). Todas estas diferencias pueden ser debidas a que la matriz tipológica utilizada en la metodología de clases de vulnerabilidad no está adaptada a la región, se ha utilizado la propuesta para Catalunya (Mañà, 1995; Chávez, 1998).

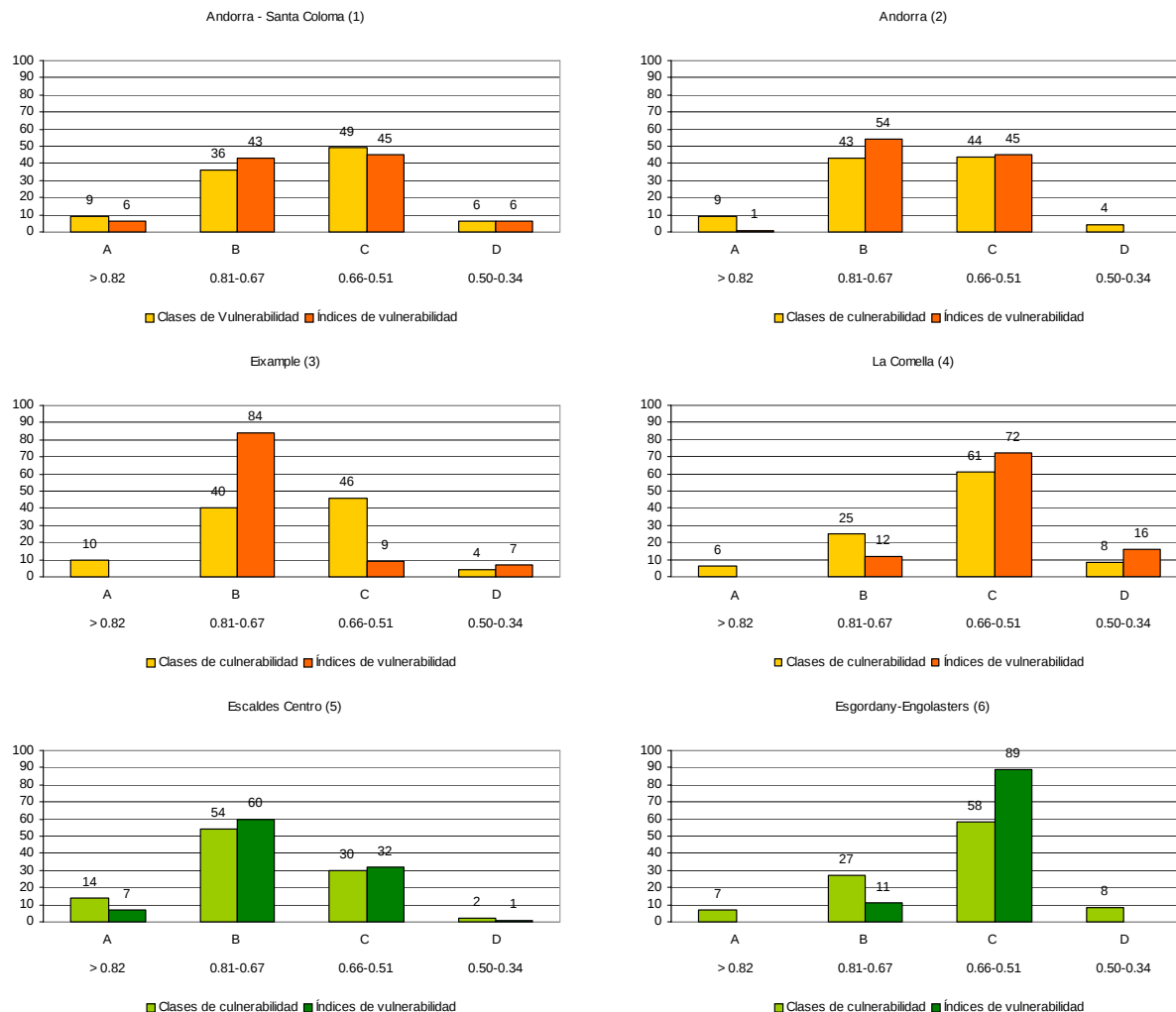


Tabla 6. Comparación de las dos metodologías. Los polígonos del 1 al 4 pertenecen a la parroquia de Andorra la Vella (en amarillo para la metodología de clases de vulnerabilidad y en naranja para la del índice de vulnerabilidad); los polígonos 5 y 6 pertenecen a la parroquia de Escaldes-Engordany (en verde claro para la metodología de clases de vulnerabilidad y en verde oscuro para la del índice de vulnerabilidad).

Escenarios de daños

Se han realizado dos tipos de escenarios de daños, uno basado en clases de vulnerabilidad sin tener en cuenta los efectos de suelo y otro basado en índices de vulnerabilidad teniendo en cuenta los efectos de suelo. A partir de los escenarios sísmicos se hace una evaluación de lo que podrían ser los daños a los edificios y a las personas.

Escenario de daños según el método de clases de vulnerabilidad

Para calcular los daños a los edificios según la metodología de clases de vulnerabilidad se han utilizado las matrices de probabilidad de daños (Roca et al., 2006; Chávez, 1998) que se obtuvieron del análisis estadístico de los datos de daños recogidos después del terremoto de Irpinia ($M_w=6.9$), ocurrido el 23 de noviembre de 1980 en el sur de Italia. El análisis permitió obtener las matrices de probabilidad de daños correspondientes a las seis clases de vulnerabilidad A, B, C, D, E y F y los grados de intensidad sísmica VI, VII, VIII, IX y X definidos por la escala EMS-98. En la tabla 7 se muestra la matriz de probabilidad de daño para la clase de vulnerabilidad A.

Clase de Vulnerabilidad A						
Daño	0	1	2	3	4	5
Intensidad						
V	0.441	0.392	0.140	0.025	0.002	0.000
VI	0.209	0.384	0.283	0.104	0.019	0.001
VII	0.08	0.263	0.346	0.227	0.074	0.01
VIII	0.01	0.075	0.227	0.346	0.262	0.08
IX	0	0.005	0.044	0.191	0.409	0.351
X	0	0	0.001	0.017	0.184	0.798

Tabla 7. Matriz de probabilidad de daños para la clase de vulnerabilidad A, Chávez (1998).

Los valores de los grados de daño a los edificios están expresados entre 0 (no daño) y 5 (muy grave).

En la tabla 8 se presentan los tres escenarios de daños obtenidos, sin tener en cuenta los efectos de suelo. La intensidad asignada al Principado para el escenario determinista es de VI-VII, para el escenario probabilista con periodo de retorno de 475 años es VII y con periodo de retorno de 1975 es de VIII. El parque de edificios para la parroquia de Andorra la Vella está compuesto por 1.363 edificios de vivienda y el de Escaldes-Engordany por 1.187 edificios.

Escenario determinista, Intensidad = VI-VII (en % de edificios)								
Población	Nº Edificios	D0 (%)	D1 (%)	D2 (%)	D3 (%)	D4 (%)	D5 (%)	Edificios inhabitables(%)
Escaldes- Engordany	1.187	42	35	16	5	1	0	4
Andorra la Vella	1.363	43	35	16	5	1	0	3
Escenario probabilista, Intensidad = VII (T= 475 años) (en % de edificios)								
Población	Nº Edificios	D0 (%)	D1 (%)	D2 (%)	D3 (%)	D4 (%)	D5 (%)	Edificios inhabitables(%)
Escaldes- Engordany	1.187	32	37	22	8	2	0	6
Andorra la Vella	1.363	33	37	21	7	2	0	5
Escenario probabilista, Intensidad = VIII (T= 1975 años) (en % de edificios)								
Población	Nº Edificios	D0 (%)	D1 (%)	D2 (%)	D3 (%)	D4 (%)	D5 (%)	Edificios inhabitables(%)
Escaldes- Engordany	1.187	15	30	30	18	7	1	17
Andorra la Vella	1.363	15	31	30	17	6	1	16

Tabla 8. Resultados de los escenarios de daños usando la metodología de las clases de vulnerabilidad.

Escenario de daño según el método del índice de vulnerabilidad

Para calcular los daños a los edificios según la metodología del índice de vulnerabilidad se han utilizado las funciones de vulnerabilidad (ecuación 1), que relacionan el grado de daño medio con la intensidad macrosísmica (I) y con el índice de vulnerabilidad (V_i), mediante la siguiente ecuación (Sandi & Floricel, 1995):

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (1)$$

Donde, μ_D es el grado de daño medio; I es la intensidad macrosísmica y V_I es el índice de vulnerabilidad. En la figura 9 se muestran las curvas de grado de daño medio para las tipologías de la zona. Los valores de los grados de daño también vienen expresados entre 0 y 5 como en la metodología anterior.

En la tabla 9 se presentan los tres escenarios de daños obtenidos, teniendo en cuenta los efectos de suelo. Las intensidades para el escenario determinista varían entre VI-VII para la zona sin amplificación del suelo hasta VIII, para la zona con más amplificación. En el escenario probabilista con periodo de retorno de 475 años las intensidades varían entre VII y VIII-IX y para el probabilista de 1975 años entre VIII y IX-X.

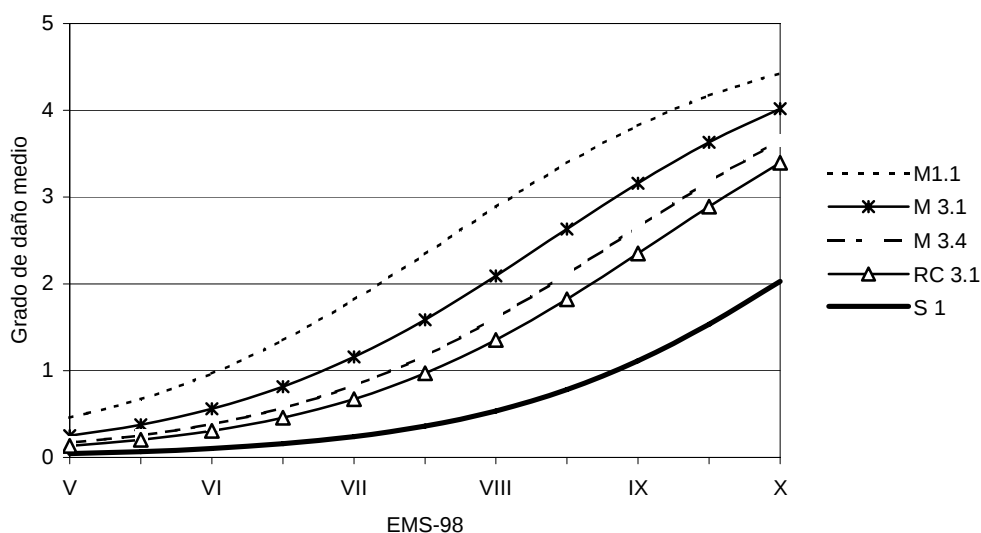


Figura 9. Curvas de grado de daño medio para las principales tipologías de la zona.

Escenario determinista (intensidades entre VI-VII y VIII) (en % de edificios)								
Población	Nº Edificios	D0 (%)	D1 (%)	D2 (%)	D3 (%)	D4 (%)	D5 (%)	Edificios inhabitables(%)
Escaldes- Engordany	1.187	58	26	11	4	1	0	3
Andorra la Vella	1.363	55	29	12	4	1	0	2
Escenario probabilista (T=475), (intensidades entre VII y VIII-IX) (en % de edificios)								
Población	Nº Edificios	D0 (%)	D1 (%)	D2 (%)	D3 (%)	D4 (%)	D5 (%)	Edificios inhabitables(%)
Escaldes- Engordany	1.187	44	30	17	7	2	0	6
Andorra la Vella	1.363	39	34	19	7	2	0	5
Escenario probabilista (T=1975), (intensidades entre VIII y IX-X) (en % de edificios)								
Población	Nº Edificios	D0 (%)	D1 (%)	D2 (%)	D3 (%)	D4 (%)	D5 (%)	Edificios inhabitables(%)
Escaldes- Engordany	1.187	17	29	26	18	8	2	19
Andorra la Vella	1.363	12	29	30	20	8	1	20

Tabla 9. Resultados de los escenarios de daños usando la metodología de los índices de vulnerabilidad, considerando los efectos de suelo.

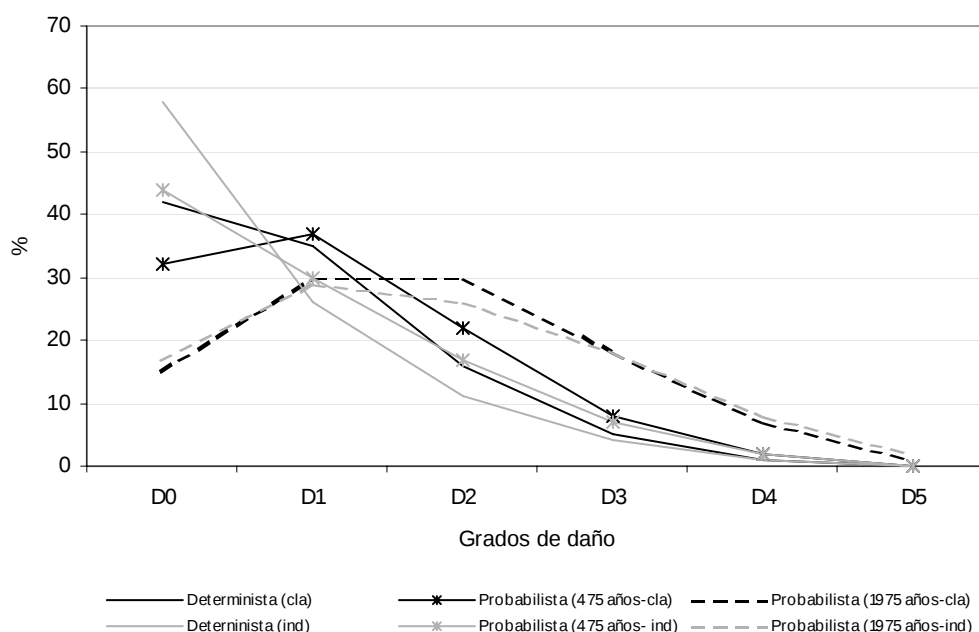


Figura 10. Comparación de las tablas 8 y 9 para la parroquia de Escaldes-Engordany.

Si se comparan los resultados de las dos metodologías, tablas 8 y 9, se observa (figura 10) que el porcentaje de edificios con grado de daño 0 (no daños) es mayor si utilizamos el método de índices de vulnerabilidad para todos los escenarios. Los grados de daño 1, 2 y 3 son mayores si se utiliza el de clases de vulnerabilidad para todos los escenarios. Los grados de daño 4 y 5 son iguales para los escenarios determinista y probabilista con periodos de retorno de 475 años y superiores para el periodo de retorno de 1975 años con el método de índice de vulnerabilidad. Para establecer las diferencias entre las dos metodologías se han comparado los resultados de las mismas usando el escenario probabilista con periodo de retorno de 475 años y sin tener en cuenta los efectos de suelo.

En la figura 11 se muestra la distribución de daños usando las dos metodologías para las dos parroquias. Se observa que las distribuciones están centradas en los daños 0 y 1 indicando que predominan, para este escenario los daños ligeros. La tendencia muestra lo que se intuía en la comparación de las tablas 8 y 9, el método de índices de vulnerabilidad da más grados de daño 0, menos grados de daño 1, 2, 3 y los grados de daño 4 y 5 son parecidos. Las diferencias de los resultados entre estas dos metodologías pueden ser debidas a la distribución de las vulnerabilidades en clases y en índices de vulnerabilidad, que como se ha visto anteriormente, la metodología del índice de vulnerabilidad muestra una vulnerabilidad más baja del parque de edificios. Por lo tanto, los daños son también inferiores.

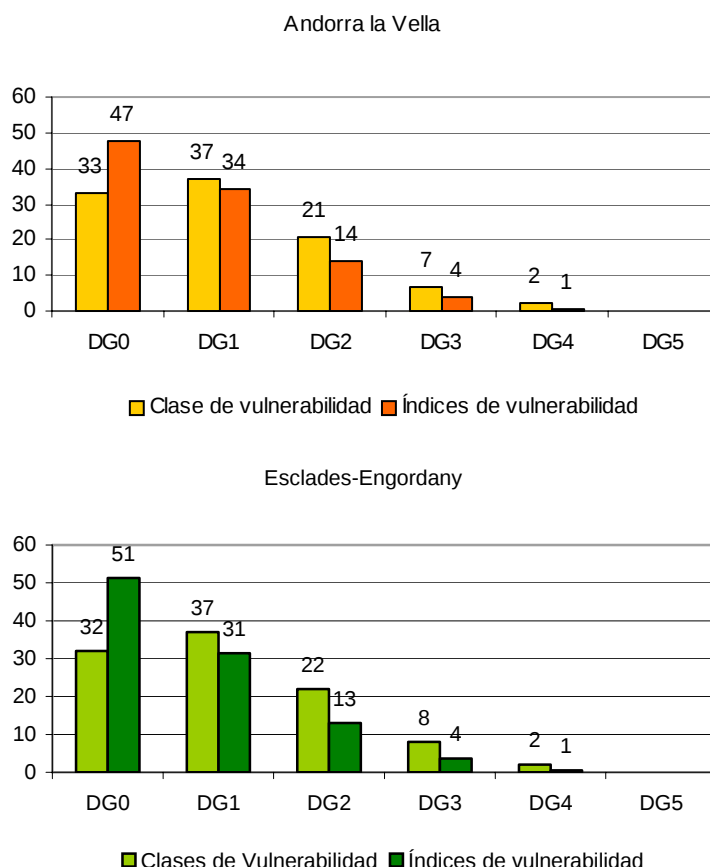


Figura 11. Distribución de daños para las parroquias de Andorra la Vella y Escaldes-Engordany para un escenario probabilista con periodo de retorno de 475 años y sin tener en cuenta los efectos de suelo.

Daño a la población

Para calcular el daño a la población se utiliza el método propuesto en ATC-13 (1985) y se expresa en función del número de personas que potencialmente podrían resultar con heridas graves o leves, así como las posibles víctimas mortales y aquellas que quedarían sin hogar.

La metodología define un porcentaje de víctimas para cada grado de daño (tabla 10). Esta metodología se ha escogido porque tiene en consideración las posibles víctimas provocadas por los más bajos grados de daño, que son los que cabe esperar en lugares de baja sismicidad.

Grado de daño	Coeficientes del estado físico de las víctimas		
	Heridos leves	Heridos graves	Muertos
1	3.3/10000	1.1/25000	1.1/100000
2	3.3/1000	1.1/2500	1.1/10000
3	3.3/100	1.1/250	1.1/1000
4	3.3/10	1.1/25	1.1/100
5	2/5	2/5	1/5

Tabla 10. Coeficientes de víctimas humanas en terremotos para cada grado de daño según ATC-13 (1985).

En la tabla 11 se presentan los resultados de la aplicación de los diferentes escenarios. Se han calculado a partir del daño a los edificios resultantes de la aplicación del

método basado en índices de vulnerabilidad y teniendo en cuenta los efectos de suelo. Se ha estimado por una parte las personas que quedarían sin hogar y por otra las víctimas, en las que están incluidos los heridos con diferentes grados e incluso las víctimas mortales.

El escenario determinista definido por un terremoto análogo al ocurrido en 1428 (intensidad epicentral IX) dejaría sin hogar alrededor de 500 personas de las parroquias de Andorra la Vella-Escalades y alrededor de 80 víctimas. El peor escenario de los presentados (correspondiente al probabilista de T=1975) dejaría a un 10% de personas sin hogar y numerosas víctimas, considerando heridos leves graves y muertos.

Población (Escenario determinista)	Personas sin Hogar	Víctimas
Escalades- Engordany	185	29
Andorra la Vella	296	51
Población (Escenario probabilista (T=475))	Personas sin Hogar	Víctimas
Escalades- Engordany	433	73
Andorra la Vella	651	133
Población Escenario probabilista (T=1975)	Personas sin Hogar	Víctimas
Escalades- Engordany	1.683	417
Andorra la Vella	2.307	617

Tabla 11. Distribución de las personas sin hogar y heridos para los diferentes escenarios, según la ATC-13.

Conclusiones

Las parroquias de Andorra la Vella y Escalades-Engordany poseen más del 50% de la población de todo el país (39.665 personas). Un estudio reciente de microzonación (Macau et al., 2006, 2007) indica que para la zona de la cubeta de Andorra la intensidad podría aumentar en algún punto de la zona en grado y medio. Las consecuencias de los escenarios considerados en este estudio podrían crear un estado de emergencia en el país que es necesario que los organismos encargados de la gestión de la emergencia conozcan, antes del sismo, como herramienta para desarrollar políticas de prevención de desastres sísmicos, y, después del sismo, como herramienta de gestión de la emergencia.

Se han definido tres escenarios sísmicos: dos probabilistas uno con periodo de retorno de 475 y otro de 1975 años, y uno determinista definido por un terremoto análogo al ocurrido en 1428 en el Ripollès (Girona) de intensidad epicentral IX. Estos escenarios han incluido los resultados de los estudios de microzonación realizados en la cubeta de Andorra (Macau et al., 2006, 2007), en los cuales la intensidad podría aumentar en algún punto hasta un grado y medio. A un 83% del área microzonada le corresponde un aumento de intensidad que va desde uno a uno y medio y además esta zona coincide con grandes áreas sin construir. Estos aumentos de intensidad, más el hecho de que en la actualidad no haya ninguna legislación que obligue a utilizar una normativa sismorresistente en el cálculo de las estructuras, indica que terremotos de intensidad moderada podrían provocar pérdidas importantes, por lo que se recomienda la creación de una normativa sismorresistente de aplicación obligatoria para los edificios de nueva construcción.

Por primera vez se ha realizado un análisis de vulnerabilidad sísmica en una zona piloto del Principado de Andorra. Para ello se ha creado una base de datos que contiene: datos sobre edificios, líneas vitales, tipologías estructurales, usos de los edificios, población, etc. Todos los datos están integrados en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

Como unidades de trabajo para representar los resultados se han escogido las

parroquias (municipios), para la metodología basada en clases de vulnerabilidad, y polígonos de población definidos en base a su distribución de tipologías estructurales para la metodología basada en índices de vulnerabilidad.

Como resultado de la aplicación del método basado en clases de vulnerabilidad se obtiene que la distribución resultante para las dos parroquias es muy parecida, siendo la clase más representativa la clase C seguida de la B, con aproximadamente un 40% de los edificios cada una. Se puede decir que los edificios de las parroquias de Escaldes-Engordany y Andorra la Vella tienen una vulnerabilidad media-baja.

La aplicación del método del índice de vulnerabilidad refleja un parque de edificios menos vulnerable. Estas diferencias pueden ser debidas a que la matriz tipológica utilizada en la metodología de clases de vulnerabilidad no está adaptada a la región, se ha utilizado la propuesta para Catalunya (Mañà, 1995; Chávez, 1998).

Para la distribución de daños se han comparado ambas metodologías usando un escenario sísmico probabilista con periodo de retorno de 475 años y sin tener en cuenta efectos de suelo. Se observa que las distribuciones están centradas en los daños 0 y 1 indicando que predominan, para este escenario los daños ligeros. La metodología del índice de vulnerabilidad refleja un porcentaje menor de los grados de daños que van del 3 a 5, que el obtenido utilizando la metodología de clases de vulnerabilidad. Como edificios inhabitables se obtendrían un 2% del conjunto para la metodología del índice de vulnerabilidad. Sin embargo para la metodología de clases de vulnerabilidad se obtendría un 5%, más del doble.

Analizando el daño a las poblaciones se obtendría que el peor escenario (probabilista con periodo de retorno de 1975 aplicando efectos de suelo) podría dejar a un 10% de personas sin hogar y alrededor de 1.000 víctimas, algunas de ellas mortales.

Referencias:

- ATC-13 (1985). "Earthquake damage evaluation data for California". Applied Technology Council (ATC). Redwood City, California.
- Barranco, L. & Izquierdo, A. (2002). "Estimación rápida preliminar de daños potenciales en España por terremotos: simulación de escenarios sísmicos (SES 2002)". Dirección General de Protección Civil y Instituto Geográfico Nacional.
- Batlle, J. (1978). "Les vallées d'Andorre: bouleversements du cadre bâti" Unité pédagogique d'architecture n°1 PARIS. Tomo1:189 p; Tomo2: de p 190 a 294.
- Batlle, J. (1980). "La production du logement dans les Vallées d'Andorra". Institut d'Urbanisme de l'Académie de Paris. Université de Paris VIII-Vincennes. Juin 1980.
- Calvo, R.; Martínez G. & Gash N. (1989). Recull estadístic general de la població Andorra 90. Conselleria de treball i benestar social.
- Chávez, J. (1998). "Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 1998. 343 p
- Coral, H. (2002). "Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2002. 207 p.
- Giovinazzi, S. & Lagomarsino, L. (2002). "A methodology for the vulnerability analysis of built-up areas". Proceedings of the International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction, Bucharest.
- Giovinazzi, S. & Lagomarsino, L. (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
- Giovinazzi, S. (2005). The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis. Tesis Doctoral. Technical University of Braunschweig. Alemania. 300 pp.
 - Govern d'Andorra (2006). "Estadístiques de població, any 2005". ISBN: 99920-0-426-6. Dipòsit legal: AND-350-06. 61p.
 - Grünthal, G. (editor) (1998), "European Macroseismic Scale 1998". *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 7, Luxembourg, 99 pp.
 - Macau, A., Figueras, S., Colas, B., Lebrun, B., Bitri, A., Susagna, T., Cirés, J., González, M., & 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, 3-8 September 2006.
 - Macau, A., Figueras, S. & Susagna, T. (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.
 - Mañà, F. (1995). "Vulnerabilidad de las construcciones tradicionales respecto a un sismo de grado VI o VII". Informe ITEC (inédito).
 - Mas, D. (1989). La casa andorrana tradicional. Premi "Principat d'Andorra", 1987. Conselleria d'Educació i Cultura. Govern d'Andorra, (447 pp) ISBN: 999-13-9-026-x.
 - 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.
 - Mouroux, P. & Lebrun, B. (2006). "RISK-UE: 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, 479-507, Springer.
 - Olivera, C., Redondo, E., Lambert J., Riera Melis, A. & Roca, A. (2006). "Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya". Generalitat de Catalunya. Institut Cartogràfic de Catalunya
 - Oliveres, A., Mallarech, J.M., Nicolau, J. & Fonolleda, M. (2005). "Primera aproximació al càlcul de la petjada ecològica D'andorra. Horitzó 2004". Documento inédito consultable en: <http://www.adn-andorra.org>
 - POUP (2003). "Plans d'Ordinació i Urbanisme Parroquial d'Escaldes-Engornday". Comú d'Escaldes-Engorndany. Documento interno.
 - Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chávez, J., González, M. & Reinoso, E. (2006). "A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in Catalonia, Spain". Bulletin of Earthquake Engineering. Springer Netherlands. SIN: 1570-761x (Paper) 1573-1456 (On line). Volume 4, Number 2. May 2006, 141-158 pp.
 - RSE (2003). "Manual d'utilització del programa de càlcul i representació d'escenaris de danys", informe intern, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 56 p.
 - Sandi, H. & Floricel, I. (1995). Analysis of seismic risk affecting the existing building stock. Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, 3, 1105-1110.
 - Secanell, R., Martín, Ch., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Bertil, D., Dominique, P., Carbon, D. & Fleta, J. (2007a). "Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region. Journal of Seismology" (Accepted).
 - Secanell, R., Martín, Ch., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Bertil, D., Dominique, P., Carbon, D. & Fleta, J. (2007b). "Evaluación probabilista de la peligrosidad sísmica de

la region pirenaica". 3er Congreso Nacional de Ingenieria Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona, 15 pp.

- Susagna, T., Goula, X., Roca, A., Pujades, L., Gasulla, N. & Palma ,J.J. (2006). "Loss scenarios for regional emergency plans: application to Catalonia, Spain In: C. S. Oliveira, A. Roca and X. Goula, (Editors), Assessing and Managing Earthquake Risk, 463 - 478, Springer.