

Anàlisi del risc al Pla d'emergències sísmiques de Catalunya

1. Introducció

Els treballs d'anàlisi de risc sísmic que es descriuen en l'article s'emmarquen dins del pla d'emergència de protecció per a risc sísmic de Catalunya (SISMICAT).

En poques paraules podríem dir que un pla d'emergència de protecció civil té com a objectiu bàsic i principal la protecció de les persones. Per aconseguir aquesta protecció, primer s'ha de saber quina pot ser la situació en que es trobin aquestes persones en cas d'emergència i aquí, l'anàlisi de risc es converteix en una eina inestimable que va molt més enllà del pur interès teòric. Una vegada coneixem el risc podem determinar les mesures de protecció més adients per a la població, les mesures que la mateixa població pot prendre per auto-protegir-se i les mesures d'actuació més adients per part dels responsables del pla d'emergència i els operatius.

No podem planificar sense tenir al cap els possibles escenaris de les emergències: hem de saber quina pot ser l'afectació territorial; el número possible de morts, de ferits, de persones que es quedin sense habitatge; l'afectació a les infraestructures de serveis bàsics (electricitat, gas, aigua, aigües residuals, telecomunicacions, mitjans de transport, etc...); els possibles efectes dòmino desencadenant d'altres emergències, etc.

Sense una anàlisi del risc seriosa, la planificació de l'emergència es fa a les palpentes i la probabilitat de ser un fracàs és molt elevada. Necessitem l'anàlisi de risc, però necessitem un producte final de l'anàlisi que pugui ser entès pels responsables d'elaborar els plans d'emergències, pels responsables de dirigir i gestionar les emergències i pels operatius. Els extensos i complexos coneixements dels tècnics i científics que es dediquen específicament a l'anàlisi de risc han de ser transformats en escenaris clars i senzills i aquesta és una tasca també molt important en l'elaboració del plans d'emergències i en especial d'un pla amb la complexitat com la que té el SISMICAT.

Les emergències sísmiques importants són d'una gran complexitat en la seva gestió: a part del seu abast que pot ser gran, poden desaparèixer els mateixos sistemes d'emergències i els serveis bàsics. Això implica una gestió en una condicions que poden ser molt diferents a d'altres emergències com els incendis forestals, els accidents amb

substàncies perilloses, nevades, etc... Aquestes peculiaritats, unides al gran desplegament logístic que requereixen, fan inestimable totes les dades que ens aporta l'anàlisi del risc.

2. Avaluació de la Perillositat sísmica

Encara que Catalunya està situada en una zona de sismicitat moderada te àrees on la probabilitat de que es donin situacions d'emergència sísmica és significativa. Per tal d'identificar aquestes zones i estimar els possibles efectes que es podrien esperar es realitzen estudis en diferents camps, principalment, en els de la geologia, la sismologia i l'enginyeria.

En el pla d'emergències sísmiques de Catalunya (SISMICAT) es recullen diferents anàlisis seguin tres aspectes principals. Primer, l'anàlisi de la perillositat per a cada municipi de Catalunya, es a dir una estimació de la intensitat que raonablement es pot esperar. En segon lloc, el càlcul de la vulnerabilitat sísmica de les estructures (edificis d'habitatges, escoles, edificis essencials, conduccions de gas o electricitat, etc...) que es troben exposades a l'acció sísmica de cada municipi. I, amb la combinació d'aquests dos aspectes, perillositat i vulnerabilitat, elaborar escenaris de risc per a cada municipi per tal d'identificar les zones de major risc de Catalunya.

2.1. Dades per la avaluació de la perillositat

2.1.1. Catàlegs sísmics

Per tal d'incorporar els avenços en el coneixement de les dades sísmiques de Catalunya, s'ha elaborat un nou Catàleg Sísmic de Catalunya que recull i unifica la informació sísmica que prové de diverses fonts. S'ha realitzat una comparació crítica i una unificació de criteris d'aquestes fonts, a més de la inclusió d'estudis recents. S'ha tingut especial cura en la revisió dels sismes amb epicentre proper a la frontera entre Espanya i França per eliminar possibles duplicacions de sismes en catàlegs dels dos països.

Tot això ha conduït finalment a la creació d'un nou catàleg de sismes percebuts per la població (*catàleg macrosísmic*) per a l'àrea d'estudi, és a dir, Catalunya i les seves rodalies al llarg de tots els temps i que conté dades de sismes des de l'any 880 aC fins 1995 (Susagna i Goula, 1999).

Del catàleg s'extrau que els sismes que han causat més danys a Catalunya van succeir en l'edat Mitjana entre els anys 1373 i 1448 amb un valor d'intensitat màxima de IX (vegeu La Punxa, nº 40, 2006).

En el segle XX el sisme més important correspon al sisme del 19 de novembre de 1923 d'intensitat VIII a la Val d'Aran que va causar dany a edificacions a la zona epicentral, aleshores no tant densament poblada com ara.

Per els sismes més recents es disposa també d'un *catàleg instrumental*. Està format per localitzacions epicentrals des de 1985, any que el nombre d'estacions sísmiques es considera suficient per una bona precisió en els càlculs dels epicentres.

2.1.2. Zonació sismotectònica

S'ha realitzat també una nova zonació sismotectònica basada en criteris geològics i sísmics.

En àrees amb una activitat sísmica moderada, com es el cas de Catalunya, on no és sempre possible identificar els epicentres dels terratrèmols amb falles conegudes, és més adient des d'un punt de vista pràctic introduir el concepte de zona sismotectònica. La hipòtesi bàsica és considerar que la heterogeneïtat de l'escorça terrestre pot explicar la distribució de la sismicitat.

La zonació tectònica (Fleta et al., 1996) és el primer pas per a una zonació sismotectònica. Aquesta zonació te en compte els paràmetres geològics més representatius de l'escorça terrestre, principalment aquells que provenen de la pròpia estructura geològica. Les variacions de diferents paràmetres geològics seleccionats permet una primera definició de zones tectòniques homogènies.

Per a obtenir la zonació sismotectònica, s'ha superposat la distribució dels sismes dels catàlegs considerats a la zonació tectònica afegint noves zones o modificant els límits per tal de tenir en compte distribucions de sismicitat no explicables per paràmetres purament geològics. Les zones frontereres amb França proposades en els estudis en els que es basa aquesta anàlisi de risc estan d'acord amb les obtingudes en estudis similars a França. Cal destacar que tres de les onze zones sismotectòniques obtingudes han estat definides únicament amb criteris de distribució de la sismicitat.

2.2. Obtenció del mapa de perillositat

L'avaluació de la perillositat sísmica s'ha dut a terme combinant mètodes deterministes i probabilistes utilitzant aquestes noves dades.

El mapa de perillositat (figura 1) s'ha basat en un primer mapa d'intensitats calculades utilitzant un model probabilista zonificat per a un període de retorn de 500 anys¹ i modificat parcialment amb un mapa determinista d'intensitats màximes percebudes en els llocs on la diferència d'intensitats entre un i l'altre és important. S'ha fet coincidir els límits de les zones sísmiques resultants amb els límits municipals.

En el mapa de la figura 1 es pot observar que les poblacions de perillositat sísmica més elevada estan situades en la part nord de Catalunya, zones on tingueren lloc els epicentres dels sismes més importants coneguts.

La presència de sòls tous en un lloc determinat pot amplificar el moviment del sòl que es podria esperar per un sòl mig. Per tenir en compte les possibles amplificacions es va procedir a l'estudi de la geologia dels més de 900 municipis de Catalunya i a la caracterització geotècnica dels nuclis urbans d'aquests en quatre tipus de sòl: R, roca dura, A, roques compactes, B, materials semi-compacts i C materials no cohesionats i arenes toves (Fleta et al., 1998). D'acord amb estudis similars es va procedir a augmentar mig grau el valor d'intensitat, resultant dels càlculs

de perillositat, quan el municipi està classificat com tipus B o C.

El mapa de zones sísmiques de la figura 1 modificat per l'efecte de sòl, que es mostra a la figura 2, indica el valor d'intensitat de base a tenir en compte al municipi per a l'aplicació o no del pla d'emergències municipal.

3. Estudi de Vulnerabilitat

Per a l'avaluació de la vulnerabilitat sísmica s'han considerat mètodes diferents, segons es tracti d'edificis d'habitatge o d'edificis essencials (hospitals, edificis de bombers, etc.) assimilats per les seves característiques constructives i estructurals o bé de línies vitals, amb característiques tècniques particulars (conduccions de gas o electricitat, transformadors elèctrics, etc.). Els mètodes tenen en comú que estimen danys per moviments sísmics expressats en intensitat macrosísmica EMS-98 com en el mapa de la figura 2.

La metodologia utilitzada per edificis d'habitatge o assimilats a habitatge té un caràcter estadístic per poder utilitzar-se amb poca informació disponible dels edificis i sense necessitar un treball de camp llarg i costós. Això implica, entre d'altres coses, que els resultats que s'obtinguin per a cada municipi, que és la unitat de treball, es refereixin sempre a valors globals, sense poder donar resultats amb detall per a edificis individuals.



Figura 1: Mapa de zones sísmiques per a un sòl de tipus mitjà.

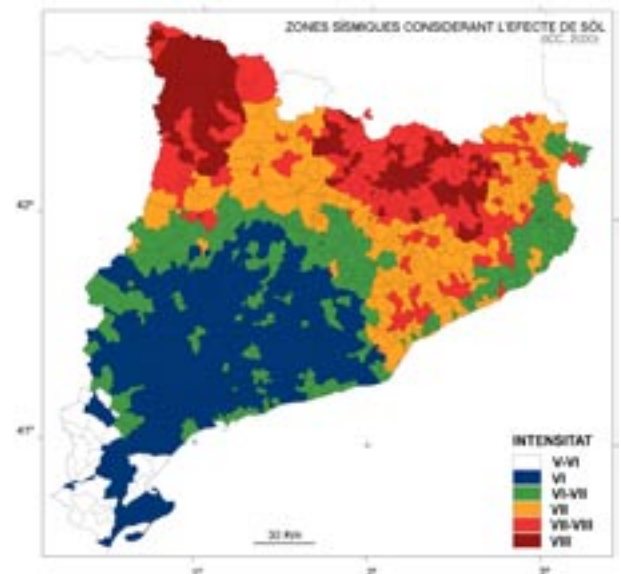


Figura 2: Mapa de zones sísmiques considerant l'efecte de sòl.

3.1. Classificació de les edificacions d'habitatges o assimilades a habitatge en classes de vulnerabilitat

La classificació dels edificis d'habitatge de Catalunya (prop d'un milió) segons les classes de vulnerabilitat definides en la escala d'intensitat EMS-98 es va dur a terme partint de les dades del cens d'edificis realitzat l'any 1990 per l'Institut d'Estadística de Catalunya (IEC). La informació disponible és l'edat, l'alçada i la situació geogràfica dels edificis.

L'edat i l'alçada estan clarament associades a la vulnerabilitat sísmica dels edificis. L'edat no només té importància pel seu efecte sobre el procés de deteriorament de la resistència de l'edifici sinó que és indicatiu de tècniques constructives, variables al llarg del temps. Segons les informacions recollides d'experts en els temes constructius s'han pogut fer tres grups d'edificis segons el període de construcció: anteriors a 1950; entre 1950 i 1970 i posteriors a 1970. Per la seva part, l'alçada influeix en el comportament dels edificis davant d'una sol·licitació sísmica. En el cas dels edificis de Catalunya, que han estat construïts únicament per aguantar càrregues gravitatòries, aquest paràmetre ha servit per a diferenciar els edificis que tenen un marge de seguretat respecte a aquells que estan en el límit de resistència. Els grups d'edificis per alçada s'han definit amb els límits següents: 12 m (menys de 5 plantes), que formen el primer grup i 18 m (més de 5 plantes), que formen el segon grup. Els edificis d'altures intermèdies (5 plantes) formen un tercer grup. Finalment s'ha tingut en compte si l'edifici pertany al nucli urbà o es tracta d'un edifici aïllat (rural).

A la taula 1 es presenta la distribució dels edificis d'habitatge de Catalunya segons els tres paràmetres assenyalats.

Com s'observa en aquesta taula, la gran majoria dels edificis de Catalunya, al voltant del 90%, es troben localitzats en nuclis urbans; similar percentatge es determina per a les edificacions menors de 5 plantes; pel que fa a la distribució per edat, s'observa el major creixement de la construcció a partir de 1970, amb un 41%.

La classificació de les edificacions d'habitatges de Catalunya en classes de vulnerabilitat (de A a D, de major a menor vulnerabilitat) d'acord a l'escala d'intensitats EMS-98, fou realitzada prenent com a base les característiques de les mateixes continguda al cens d'edificis de 1990 (Chávez, 1998). Amb l'experiència de tècnics de l'àrea de la construcció fou possible estimar les tipologies constructives pròpies de cada època, que s'han anat utilitzant als diferents períodes de temps considerats (Mañà, 1995). L'estat de conservació dels edificis és un altre paràmetre que s'ha pogut utilitzar gràcies a un estudi realitzat per la *Direcció General d'Arquitectura i Habitatge*, en una mostra representativa dels edificis de Catalunya.

Finalment, a la taula 2, es mostra la classificació pel conjunt d'edificis de Catalunya en classes de vulnerabilitat on s'observa que la majoria d'ells corresponen a les classes B i C amb un 40 i un 45% respectivament.

3.3. Estimació de danys relacionats amb edificis d'habitatge

Es va dur a terme una estimació dels danys que poden experimentar els edificis dels diferents municipis de Catalunya (Chávez, 1998), considerant les intensitats previstes en el mapa de zones sísmiques de la figura 2. A més, com a resultat del dany causat als edificis es va realitzar un escenari de les conseqüències per a la població de cada municipi.

Data de Construcció		Fins 1950		1951-1970		Després de 1970	
Àrea de Situació		Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Alçada	< 5 plantes	232740	31119	212070	16304	315504	37346
	= 5 plantes	7065	9	14083	24	11937	22
	> 5 plantes	12699	2	21963	33	22028	44

Taula 1: Distribució dels edificis d'habitatge de Catalunya segons l'alçada, l'any de construcció i la situació (IEC, 1990).

Alçada	Fins 1950		1951-1970		Després de 1970	
	Àrea		Àrea		Àrea	
	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
< 5 plantes	20% A	30% A	5% A	15% A		5% A
	80% B	70% B	50% B	70% B		20% B
			45% C	15% C	85% C	65% C
				15% D	10% D	
= 5 plantes	20% A	40% A	10% A	20% A	5% A	10% A
	80% B	60% B	60% B	70% B	20% B	30% B
			30% C	10% C	65% C	55% C
				10% D	5% D	
> 5 plantes	40% A	60% A	15% A	30% A	8% A	15% A
	60% B	40% B	70% B	65% B	27% B	45% B
			15% C	5% C	60% C	40% C
				5% D		

Taula 2: Agrupació dels edificis de Catalunya en classes de vulnerabilitat.

3.3.1. Estimació del dany als edificis

Per l'estimació del dany que podrien experimentar les edificacions d'habitatge dels diferents municipis, considerant la intensitat (de V a X) del mapa de perillositat (figura 2) s'utilitza l'escala de dany de l'escala d'intensitats EMS 98 que considera el grau de dany que podrien experimentar segons la seva vulnerabilitat des de dany 0 (no dany) a 5 (col·lapse total).

A partir del dany que experimenten els edificis es fa una estimació dels que podrien quedar en condicions inhabitable, considerant-se en aquest estat aquells que sofreixin els graus de danys 4 (molt greu) i 5 així com un 50% dels que experimenten dany 3 (greu). Aquests resultats són de màxima importància per a l'avaluació del nombre de persones que poden quedar sense habitatge. A la figura 3 es mostra, per a cada municipi, l'estimació del nombre d'edificis que resultarien inhabitable, immediatament després de produir-se el terratrèmol.

Com a síntesi dels resultats d'aquestes estimacions s'obté que un gran nombre de municipis, poc menys de 400 resultarien poc afectats: menys de 10 edificis inhabitable; aproximadament la meitat de municipis de Catalunya veurien entre 10 i 100 edificis resultar inhabitable; menys de 100 municipis tindrien un nombre superior a 100 edificis,

sense poder ser habitats després del terratrèmol. És molt important tenir en ment que les intensitats del mapa de la figura 2 de tot Catalunya no es produeixen a tots els municipis al mateix temps, sinó que és el resultat d'un càlcul probabilista de la intensitat que té en compte la possibilitat de diferents terratrèmols.

3.3.2. Estimació del dany a la població

La possibilitat de patir víctimes humanes com a conseqüència de l'acció d'un terratrèmol està directament lligat al nombre d'edificis danyats com conseqüència de la intensitat del moviment sísmic i al nombre de persones que hi viuen, però depèn a més d'altres circumstàncies com l'època de l'any, el dia o l'hora que es produeixi el terratrèmol i també de la preparació dels responsables de Protecció Civil i dels ciutadans per fer front als primers auxilis.

En una primera aproximació es pot fer una estimació del nombre de víctimes, de diferent gravetat, a partir de dades observades de terratrèmols ocorreguts en d'altres indrets del món i considerant els resultats de les estimacions d'edificis danyats, que s'han exposat anteriorment, acompanyades de les dades del cens de població.

Les dades dels cens de població (any 1996) juntament amb el cens d'edificis permet fer una es-

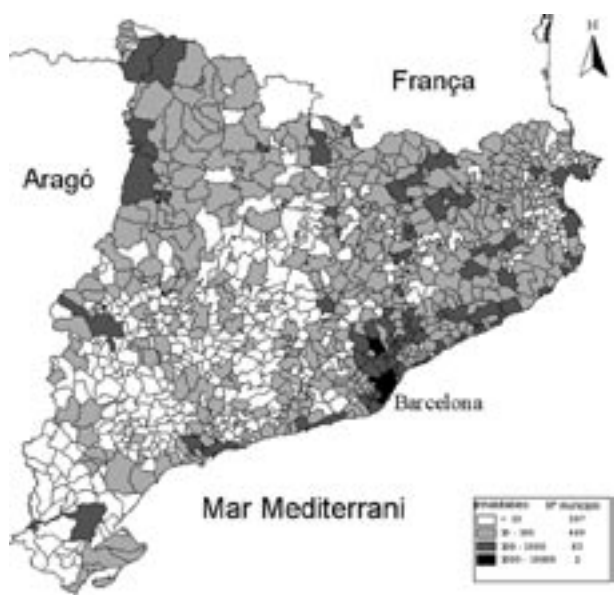


Figura 3: Mapa amb l'estimació del nombre d'edificis inhabitables després d'assolir-se el grau d'intensitat considerat en el mapa de la figura 2.

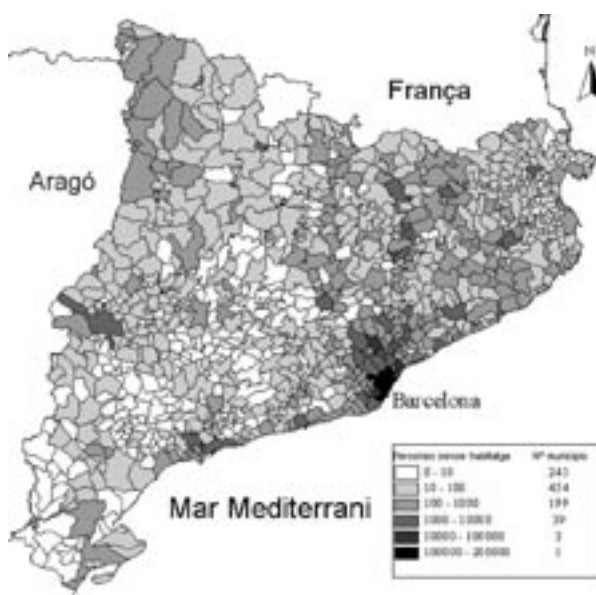


Figura 4: Mapa amb l'estimació aproximada de la distribució del nombre de persones que poden perdre el seu habitatge al assolir-se el grau d'intensitat de la figura 2.

timació del nombre mitjà de persones per edifici. Com resultat s'observa que per la gran majoria de municipis, més de 800, el nombre mitjà de persones per edifici és inferior a 5 habitants i només alguns municipis, com Barcelona i d'altres de la seva àrea d'influència, arriben a valors mitjans de quasi 30 habitants per edifici.

A la figura 4 es presenta un mapa amb l'estimació aproximada, per a cada municipi, del nombre de persones que podrien resultar sense llar degut a la inhabilitat del seu habitatge en cas de terratrèmol.

Els habitants de les quasi dos terceres parts del nombre total dels municipis de Catalunya es veurien poc afectats per un terratrèmol, menys de 100 persones per municipi. El límit superior correspon a la ciutat de Barcelona amb un total de més de 100.000 persones que quedarien sense llar, en el cas que es produís la intensitat indicada en el mapa de zones sísmiques (figura 2).

Tant en la figura amb la distribució d'edificis inhabitables com en la de les persones sense llar es reflexa clarament els dos aspectes més importants que afecten el risc sísmic. Efectes importants, primer, en zones de baixa població però d'alta perillositat, com comarques dels Pirineus (que per altre banda poden ser més poblades puntualment), i segon, zones d'alta població de perillositat més baixa.

3.4. Estimació de danys a edificis essencials

Es va dur a terme una estimació dels danys que poden experimentar els hospitals i parcs de bombers de Catalunya, considerant les intensitats previstes en el mapa de zones sísmiques presentat a la figura 2 i la classificació dels seus edificis en diferents tipologies de la mateixa manera que per als edificis d'habitatges.

Analitzant el comportament de les diferents tipologies es defineixen 4 classes de comportament que molt probablement resultarien d'assolir la intensitat indicada:

- Comportament 1 significa que després del terratrèmol l'edifici quedaria indemne i podria continuar amb les seves funcions.
- Comportament 2 significa que després del terratrèmol la instal·lació segueix operativa, però és recomanable una inspecció de totes les instal·lacions.
- Comportament 3 significa que després del terratrèmol la instal·lació quedaria fora de servei, be que l'edifici continués sent habitable. Es recomanable en aquest cas una inspecció de l'edifici.
- Comportament 4 significa que després del terratrèmol caldria evacuar l'edifici.

Per la xarxa d'hospitals d'utilitat pública (XUP) resulta que la majoria (60%) li correspondria un comportament 2 i cap un comportament 4.

Pel parc de bombers la majoria (55%) tindria un comportament 1 i també cap tindria un comportament 4.

3.5. Estimació de danys a línies vitals

Per a l'estimació de danys a les línies vitals es va seguir la metodologia proposada pel "Consell de Tecnologia Aplicada (ATC)" de Califòrnia (ATC-13 1985, ATC-25 1991). Aquests mètodes tenen una ampla difusió i acceptació internacional. A més, són de fàcil aplicació una vegada es disposen de les dades sobre els elements a que es vol aplicar; aquest aspecte és molt important donat la gran quantitat d'elements que s'han d'analitzar a tota Catalunya. En general les línies vitals com per exemple carreteres, ferrocarril i conduccions soterrades tenen un bon comportament sísmic per les intensitats sísmiques que són esperables a Catalunya (Figura 2), però es detecten serveis i instal·lacions com per exemple les estacions transformadores d'electricitat o les estacions de bombeig d'aigua entre d'altres que es poden danyar i causar incidències en aquests serveis. Cal dir, però que els resultats són d'una estimació estadística general que han permès detectar els punts més vulnerables de les línies vitals a Catalunya i que calen metodologies més detallades per a estudiar casos concrets que així ho requereixin degut a la seva vulnerabilitat i importància



Figura 5: Dany esperat en les línies de transmissió elèctrica de 400 kV.

Amb aquesta metodologia s'han analitzat dins el pla SISMICAT les següents línies vitals: xarxa viària, transport ferroviari, transport aeri, transport marítim, sistema elèctric, aigües d'abastament, aigües residuals, xarxa de gas natural, comunicacions i elements de risc major.

A la figura 5 es mostra, com exemple d'anàlisi realitzat, el dany esperat en el cas de les línies de transmissió elèctrica pel cas de línies de 400kV.

Teresa Susagna

Institut Geològic de Catalunya

Lluís Pujades

Universitat Politècnica de Catalunya

José Julio Palma

Direcció General d'Emergències i Protecció Civil

Referències

1. ATC-13 (*Applied Technology Council*) *Earthquake Damage evaluation data for California*. Report ATC-13, Redwood City, California, 1985.
2. ATC-25 (*Applied Technology Council*) *Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the coterminous United States*. Report ATC-25, Redwood City, California, 1991.
3. Chávez, J. (1998). *Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña*. Tesis Doctoral. Universidad Politècnica de Cataluña, Barcelona, 343 p.
4. EMS-98, Grünthal, G. (editor) (1998). *European Macroseismic Scale 1998*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 7, Luxembourg, 99 pp.
5. Fleta, J., Estruch, I. i Goula, X. (1998), "Geotechnical characterization for the regional assesment of seismic risc in Catalonia". Proc. of the IV Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section). Barcelona. 669-702.
6. Fleta, J., Escuer, J., Goula, X., Olivera, C., Combes, Ph., Grellet, B. i Granier, Th. (1996). Zonación tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la península Ibérica (Catalunya), *Geogaceta* 20(4), 853-856.
7. Mañà, F. (1995). Vulnerabilidad de las construcciones tradicionales respecto a un sismo de grado VI o VII. Informe ITEC, Barcelona.
8. Secanell, R. (1999). *Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics*. PhD-Thesis, Univ. Barcelona 335 pp.
9. Susagna, T. i Goula, X. (1999). *Catàleg de Sismicitat. Atlas Sísmic de Catalunya*, Vol. 1, 436 pp.

Notes

1. Els valors d'intensitats calculades per a cada municipi, representa el valor que s'espera s'assoleixi o es superi en 500 anys. Un període de retorn de 500 anys és el que s'utilitza també en les normes de construcció sismoresistent.