

GESTIÓ DEL RISC SÍSMIC A CATALUNYA

Xavier Goula. Cap de la Unitat de Sismologia de l'Institut Cartogràfic de Catalunya
Parc de Montjuïc s/n, 08038 Barcelona, Espanya. xgoula@icc.es

1. CONSIDERACIONS PRÈVIES

El risc sísmic és un concepte d'ordre social i econòmic. Consisteix en la possibilitat de pèrdues de vides humanes i de pèrdues econòmiques degut a l'acció d'un sísmic. Té dues components principals:

- el terratrèmol,
- l'entorn humà compost per habitatges, serveis, instal·lacions, etc.

Des d'un punt de vista econòmic:

$$RISC = PERILLOSITAT * VULNERABILITAT * COST$$

Així, un mateix terratrèmol pot ser destructor si es produeix en zones molt habitades i les construccions són de mala qualitat, o bé causar pocs danys si la zona és deserta o les construccions de bona qualitat.

Per mitigar o reduir el risc en un lloc donat, existeixen diverses estratègies:

- reduir el factor perillositat. Només es podria fer amb una bona *predicció* del lloc i el moment que s'hagi de produir el terratrèmol. Podria salvar vides humanes, però difícilment les pèrdues econòmiques. De totes maneres, actualment, no existeix cap sistema fiable de predicció de terratrèmols,
- reduir el factor vulnerabilitat. Demana una bona *prevenció* que s'ha de basar en l'avaluació de la perillositat sísmica i en l'adequació i correcta aplicació de les normes de construcció sísmoresistent per a les noves construccions i la rehabilitació de les existents,
- preparar l'emergència sísmica per pal·liar el dany causat per un terratrèmol. Demana la *preparació de Plans d'Emergència* que s'han de basar en l'avaluació de la perillositat sísmica i de la vulnerabilitat de les construccions i línies vitals existents, per tal de disposar d'escenaris de danys el més realistes possibles, per guiar l'actuació davant l'emergència.

A Catalunya, la prevenció del risc es du a terme amb l'aplicació de la Norma de Construcció Sísmoresistent NCSE-94 (1995), d'obligat compliment a l'Estat Espanyol i properament amb l'aplicació de l'Eurocòdig (EC8). Per a la preparació dels plans d'emergència a Catalunya s'està duent a terme la redacció del pla SISMICAT per part de la Direcció General d'Emergències de la Generalitat de Catalunya seguint la "Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico", publicada en el "Boletín Oficial del Estado" de 25 de maig de 1995.

En aquest document es presenten part dels treballs tècnics elaborats a l'Institut Cartogràfic de Catalunya que fan part de l'ATLAS SÍSMIC DE CATALUNYA (vol 1, publicat el 1999 i vols 2 i 3 en preparació) i que serveixen de base a la preparació del Pla SISMICAT de la Generalitat de Catalunya, així com a la preparació del Pla Específic d'Emergència Municipal (PEEM) de la ciutat de Barcelona realitzat per l'Ajuntament de Barcelona.

2. AVALUACIÓ DE LA PERILLOSITAT SÍSMICA.

Per a la correcta avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya, l'ICC ha elaborat el nou Catàleg Sísmic de Catalunya que recull i unifica la informació sísmica que prové de diverses fonts existents fins al moment. També s'ha realitzat una nova zonació sismotectònica basada en criteris geològics i sísmics. L'avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya s'ha dut a terme tot combinant mètodes deterministes i probabilistes que tenen en compte aquestes noves dades.

Zonació tectònica

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

La zonació tectònica és el primer pas per a una zonació sismotectònica. Aquesta zonació ha tingut en compte els paràmetres geològics més representatius de l'escorça terrestre, principalment aquells que provenen de la pròpia estructura geològica sense tenir, però, en compte la neotectònica (postmiocè). Les variacions de diferents paràmetres geològics seleccionats permet una primera definició de zones tectòniques homogènies.

Els paràmetres geològics i geofísics seleccionats són els següents:

- Discontinuitat de Mohorovicic o espessor de l'escorça.
- Deformació hercínica, grau de deformació moderada de la sèrie sedimentària paleozoica domini fràgil amb encavalcaments i domini dúctil amb desenvolupament d'esquistositat.
- Isobates del basament o fondària a la que es troba el sostre del basament.
- Estat de la deformació de la cobertura sedimentària mesocenozoica, com a indicador de la deformació alpina,
- Tectònica neògena, indicador dels processos extensionals cenozoics.
- Distribució de nivells evaporítics, com a nivells preferencials de lliscament.

S'han definit diverses zones tectòniques segons els criteris descrits a la taula 1 (Fleta et al., 1996). En el mapa de la figura 1 es mostra la zonació tectònica resultant.

		ZONA AXIAL CENTRAL A1a	Escorça engruixida (>35 km) Basament deformat	
DOMINI DEFORMAT A	PIRINEUS A1	ZONA EXTERNA SUR A1b	Basament profund (> 3 km) Cobertura sedimentària deformada i desplaçada	
		ZONA AXIAL ORIENTAL A1c	Basament aflorant Escorça intermitja	
		CONQUES ORIENTALS A1d	Tectònica neògena Basament superficial	
	SISTEMA MEDITERRANI A2	SERRALADA NORD- IBERICA A2a		Basament hercinià deformat Estructuració neògena distensiva
		SERRALAD ES IBERIQUES A2b	OCCIDENT AL A2b1	Cobertura deformada i desplaçada
			ORIENTAL A2b2	Cobertura deformada i desplaçada Tectònica neògena distensiva
		CONCA CATALANOBLEAR A3		Escorça aprimada (< 20 km)
	CONCA DE L'EBRE DEFORMADA A4		Cobertura sedimentària deformada i desplaçada Escorça d'espessor normal (30 km)	
DOMINI NO DEFORMAT B	CONCA DE L'EBRE NO DEFORMADA		Avantpaís no deformat Espessor d'escorça normal (30 km) Cobertura sedimentària no deformada	

Taula 1. Definició de les zones tectòniques, amb els criteris utilitzats (segons Fleta et al., 1996)

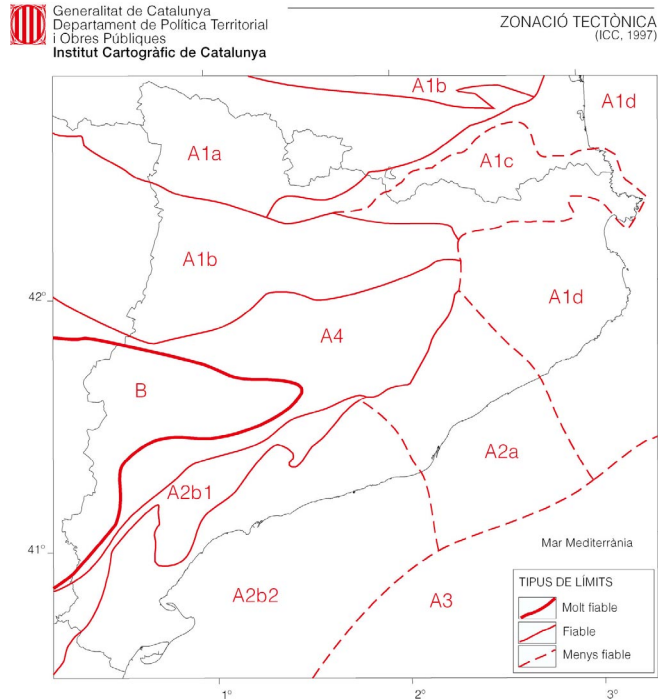


Figura1. Mapa de Zonació tectònica (segons Fleita et al., 1996)

Catàleg de sismicitat

La descripció dels efectes dels sismes sobre persones, objectes i edificis (intensitat macrosísmica) recollida des de temps històrics fins l'actualitat ha permès tenir un bon coneixement de la sismicitat. Per altra banda, des de 1985 la densitat d'estacions sísmiques en funcionament a Catalunya permet la localització precisa dels sismes, fins i tot de petita magnitud.

- Catàleg macrosísmic

Per tal de millorar les estimacions sobre perillositat sísmica existents s'ha realitzat una revisió dels catàlegs disponibles en l'actualitat i s'ha confeccionat un nou catàleg sísmic que ha estat la base dels estudis de perillositat sísmica.

S'ha realitzat una comparació crítica i una unificació de criteris de les diferents fonts, a més de la inclusió de nous estudis específics. Tot això ha conduït finalment a la creació d'un nou catàleg per a l'àrea d'estudi, és a dir, Catalunya i les seves rodalies. S'ha tingut especial cura en la revisió dels sismes amb epicentre proper a la frontera entre Espanya i França. Les pautes seguides per a la confecció d'aquest nou catàleg sísmic estan d'acord amb els criteris establerts en la confecció d'un catàleg europeu. Aquestes informacions es troben recollides en el Catàleg de Sismicitat, Volum I de l'Atlas Sísmic de Catalunya (Susagna i Goula, 1999).

A més d'utilitzar les dades del Catàleg Sísmic, s'ha ampliat la zona d'estudi per tal de tenir en compte els possibles efectes de sismes dels Pirineus Centrals i Occidentals i del País Valencià. S'ha ampliat doncs el Catàleg amb dades d'aquestes zones, revisades amb criteris anàlegs als del Catàleg de Catalunya.

Els epicentres dels terratrèmols que han causat danys a Catalunya o en regions veïnes es presenten en el mapa de la figura 2.



Figura 2. Mapa d'epicentres dels terratrèmols que ha causat danys a Catalunya (segons Susagna i Goula, 1999).

Cal destacar els terratrèmols següents:

- 3 /03/ 1373 a la Ribagorça, amb intensitat epicentral VIII-IX,
- Crisi sísmica de 1427-1428 a la Selva, Garrotxa i Ripollès, amb els tres sismes principals següents:
 - /03/1427 a Amer, amb intensitat acumulada VIII-IX,
 - 15/05/1427 a Olot, amb intensitat epicentral IX,
 - 02/02/1428 al Ripollès, amb intensitat epicentral IX,
- 24/05/1448 al Vallès Oriental, amb intensitat epicentral VIII.

En resum, els sismes més destructors a Catalunya van succeir entre els anys 1373 i 1448.

Al segle XX, hi han hagut un centenar de sismes amb una intensitat epicentral superior o igual a V. Només dos sismes, afortunadament, han produït danys considerables en aquest segle:

- 19/11/1923 a la Vall d'Aran, amb intensitat epicentral VIII
- 12/03/1927 a Sant Celoni, amb intensitat epicentral VII.

- **Sismicitat instrumental**

La sismicitat determinada a partir de les dades enregistrades pels sismògrafs ha estat recollida en els Butlletins Sismològics de Catalunya des de 1984 (SGC, 1984 a 1994; SGC/ICC, 1995 a 1999). De la sismicitat d'aquests últims anys cal destacar-ne les següents observacions:

- A la zona costanera s'han produït quatre sèries de sismes amb magnituds superiors a 4.0, els anys 1987, 1991, 1994 i 1995, tots ells percebuts per la població però afortunadament sense danys materials. La sèrie més important correspon a la de maig de 1995, amb un sisme principal de magnitud 4.6, un dels sismes més importants d'aquest segle a la costa de Tarragona. Tots aquests sismes han ocorregut en zona marítima, a uns 20- 30 km de la costa.
- El 18 de febrer de 1996 va produir-se un terratrèmol al Sud de França, percebut àmpliament a Catalunya. El sisme, de magnitud 5.2 i intensitat epicentral VI MSK (danys lleugers a la regió de Sant Pau de Fenolhet), és el més fort des de l'any 1950 al Pirineu Oriental.

Mapa de perillositat determinista

El mapa d'intensitats màximes probablement percebudes a Catalunya representa la intensitat màxima que probablement s'hagi sentit en cada punt de la regió d'estudi com a conseqüència dels sismes coneguts ocorreguts a Catalunya i les seves rodalies des del segle XIII, data més antiga amb informació sísmica disponible. L'estimació d'aquesta intensitat en cada punt de Catalunya ha estat obtinguda aplicant a cada sisme del catàleg un model d'atenuació de la intensitat amb la distància. D'aquesta manera, en cada punt de Catalunya, es pot saber la intensitat que probablement es va sentir deguda a cadascun dels terratrèmols del catàleg. Amb la consideració dels efectes de tots els sismes es pot deduir la intensitat màxima en cada punt. S'obté així un mapa de perillositat de tipus determinista.

Mapa de perillositat probabilista

L'avaluació de la perillositat sísmica ha estat també realitzada amb un model probabilista zonificat. S'ha seguit essencialment un model de càlcul de la perillositat sísmica extensament utilitzat arreu del món basat en un model d'ocurrència de terratrèmols de tipus Poissonià estacionari.

En àrees amb una activitat sísmica moderada, com la del present estudi, 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 que parlar de falles actives. L'hipòtesi bàsica és considerar que l'heterogeneïtat de l'escorça terrestre pot explicar la distribució de la sismicitat. Per a obtenir la zonació sismotectònica, s'ha incorporat la distribució sísmica 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 basan aquesta anàlisi de risc estan d'acord amb les obtingudes en estudis similars a França. Cal destacar que tres de les onze zones sismotectòniques han estat definides únicament amb criteris de distribució de la sismicitat.

A la figura 3 es mostren els epicentres dels terratrèmols considerats en l'avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya juntament amb les zones sismotectòniques definides.

El procés seguit per aquests tipus de models es pot resumir de la següent manera:

1. En cadascuna de les zones sismotectòniques mostrades a la figura 3 i d'acord amb les dades disponibles en cada zona proporcionades pel catàleg sísmic, s'ajusten els paràmetres característics al model d'ocurrència de terratrèmols utilitzat.
2. Una vegada s'han deduït totes les distribucions de probabilitat d'ocurrència de terratrèmols de cada zona sismotectònica, es propaguen els efectes de la sismicitat de cada zona sismotectònica a cada punt de Catalunya d'acord amb unes lleis d'atenuació de la intensitat sísmica amb la distància ajustades per Catalunya.
3. En cadascun dels punts de Catalunya s'estudien els efectes sísmics que provenen de cada zona sismotectònica i es calcula la probabilitat d'excedir una intensitat determinada en un període de temps donat.

S'ha dut a terme una anàlisi de sensibilitat utilitzant la generació estocàstica de diferents casos per un procés de Montecarlo. Això ha permès de fer una estimació realista de la precisió dels resultats obtinguts (Secanell et al., 1998; Secanell 1999). El valor de la Desviació Standard no supera el mig grau d'intensitat per un període de retorn de 500 anys.

Mapa de zones sísmiques per un sòl de tipus mitjà

El mapa que determina les diferents àrees del territori en funció a la seva perillositat sísmica és el mapa de zones sísmiques. Aquest mapa és la síntesi dels resultats obtinguts amb els dos procediments, un determinista i un altre probabilista i tenint en compte els valors de les precisions estadístiques obtingudes.

A la figura 4, es presenta el mapa de zones sísmiques, basat en el mapa probabilista i modificat parcialment pel mapa determinista en els llocs on la diferència d'intensitats és important, per a un període de retorn de 500 anys. Per a la confecció d'aquest mapa s'ha fet coincidir els límits de les zones sísmiques amb límits municipals.

Aquest mapa està referit a un sòl de tipus mitjà, que segons la classificació geotècnica que es presenta en el següent apartat correspon a un sòl de tipus A (45% dels municipis).

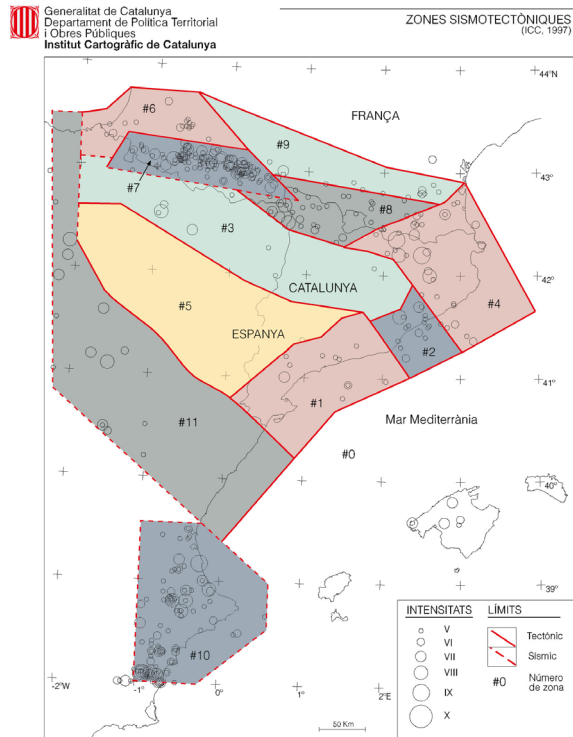


Figura 3. Mapa de zones sismotectòniques (segons Goula et al., 1997).

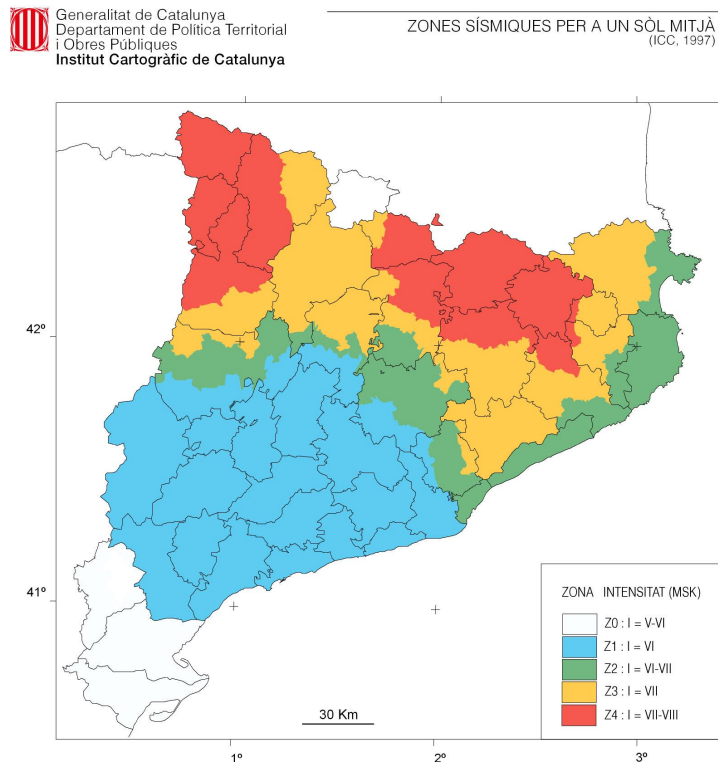


Figura 4. Mapa de zones sísmiques per a un sòl mitjà (segons Secanell, 1999).

Mapa de zones sísmiques considerant efectes de sòl.

S'ha procedit a l'estudi de la geologia de cadascun dels 944 municipis de Catalunya i a la caracterització geotècnica dels nuclis urbans dels municipis de Catalunya. Aquesta classificació es basa en una proposta de classificació geotècnica segons quatre tipus de sòls R, A, B i C, amb una resposta

particular en front del fenomen sísmic. Aquesta classificació de sòls està associada a la velocitat que tenen les ones S en travessar-los. El sòl tipus R correspon a una roca dura on la velocitat de les ones S és superior a 800 m/s. El tipus A correspon a roques compactes amb velocitat de les ones S entre 800 i 400 m/s. El tipus B a materials semicompactats tous amb velocitats de les ones S entre 400 i 150 m/s. Per últim, el tipus C correspon a material no cohesionat i arenes toves. La velocitat de les ones S és inferior a 150 m/s.

La classificació s'ha realitzat en 2 passos:

- En el primer d'ells, a partir del mapa geològic 1:250.000 on hi ha representats 84 tipus de litologies diferents, s'ha passat a la simplificació i reducció d'aquests tipus de sòls a quatre tipologies.
- En el segon pas, aquesta primera simplificació ha estat millorada utilitzant tots els mapes disponibles d'escala fins a 1:10.000 amb 326 tipus litològics i una classificació areal qualitativa dels nuclis urbans de tots els municipis.

En el mapa de la figura 5 es presenta la classificació geotècnica dels nuclis urbans de tots els municipis segons els quatre tipus de sòls definits (Fleta et al., 1998).

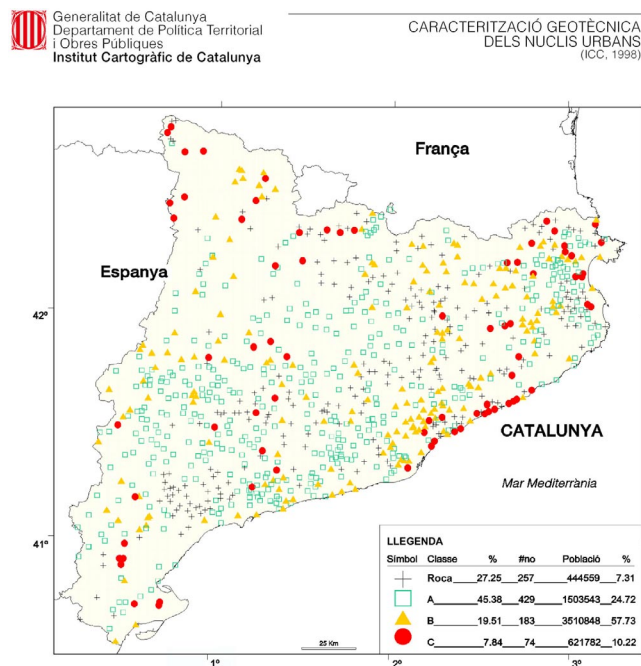


Figura 5. Mapa de caracterització geotècnica dels nuclis urbans (segons Fleta et al., 1998).

Per a tenir en compte les possibles amplificacions produïdes per sòls tous, tipus B i C, i d'acord amb estudis similars s'ha considerat un augment de la intensitat per a cadascun dels 4 tipus de sòl establerts. Les amplificacions proposades són les següents:

- Tipus R: no s'hi suma cap grau d'intensitat.
- Tipus A: no s'hi suma cap grau d'intensitat.
- Tipus B: se suma 0.5 grau d'intensitat a la intensitat del mapa de zones sísmiques.
- Tipus C: se suma 0.5 grau d'intensitat a la intensitat del mapa de zones sísmiques.

El mapa final de zones sísmiques considerant l'efecte de sòl es mostra a la figura 6.

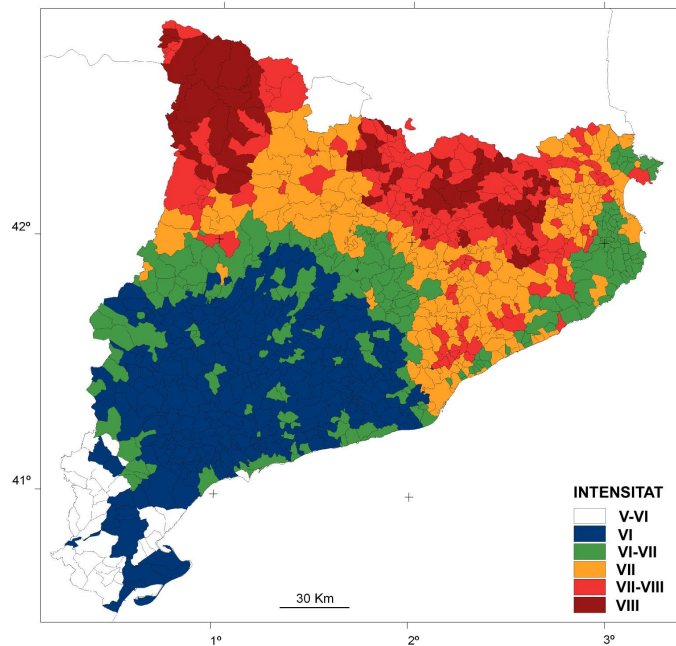


Figura 6. Mapa de zones sísmiques considerant l'efecte de sòl (segons Secanell, 1999).

3. AVALUACIÓ DE LA VULNERABILITAT SÍSMICA.

Per a l'avaluació de la vulnerabilitat sísmica s'han considerat mètodes diferents, segons es tracti d'edificis d'habitatge o assimilats per les seves característiques constructives i estructurals (hospitals, edificis de bombers, etc.) 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 (mapa de zones sísmiques de la figura 6) i per tant estan basats en la nova escala d'intensitats EMS-92 – que completa la definició de l'escala d'intensitat MSK – ja que de fet, les tipologies constructives poden ser expressades sense massa dificultats en les tipologies definides en la escala EMS'92 i els danys que poden esperar-se per a una certa intensitat poden deduir-se de la matriu de probabilitat de danys d'acord amb aquesta escala.

La metodologia utilitzada per edificis d'habitatge o assimilats 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 escollida, es refereixin sempre a valors globals, sense poder donar resultats amb detall per a edificis individuals (Chávez, 1998; Chávez et al., 1998). En el cas d'interessar-nos per edificis individuals, com són els edificis amb serveis imprescindibles per a la comunitat, la metodologia només permetrà obtenir un resultat probabilista per traduir l'aspecte estadístic de l'anàlisi.

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 EMS-92 s'ha dut 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 1950. 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.

A la taula 2 es presenta la distribució dels edificis d'habitatge de Catalunya (apr. 935000) segons els tres paràmetres assenyalats.

Data de Construcció		Fins 1950		1951-1970		Posterior a 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 2. Distribució dels edificis d'habitatge de Catalunya segons l'alçada, l'any de construcció i la situació (IEC, 1990).

Com s'observa en aquesta taula, la gran majoria dels edificis de Catalunya, al voltant del 90%, es troben localitzats en nuclis urbans; un percentatge similar resulta 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%.

Una altra informació utilitzada per a la classificació de les edificacions en classes de vulnerabilitat fou la tipologia estructural i l'estat de conservació dels edificis. Les diferents tipologies estructurals utilitzades a Catalunya han estat identificades a partir de les èpoques de construcció considerades. La ponderació de tota la informació disponible, amb els criteris de l'EMS-92 i el judici d'expert va permetre fer una classificació de les edificacions en classes de vulnerabilitat que s'expressa en funció dels tres principals paràmetres (Chávez, 1998; Chávez et al., 1998), tal i com es presenta a la taula 3. Aquesta classificació fou plantejada prenent pròpiament en compte els criteris de l'EMS-92, els quals foren ajustats a la realitat concreta de Catalunya a través dels diversos paràmetres disponibles sobre les construccions de la regió. Diferents percentatges d'edificis associats amb els diferents grups d'edat, alçada i localització, foren assignats a les classes de vulnerabilitat considerades. Aquests percentatges posen de manifest la consideració dels paràmetres que s'han descrit anteriorment. En aquesta classificació s'adverteix un clar augment de la vulnerabilitat en funció de l'edat, l'alçada i la localització; aquest últim paràmetre és important degut a què la qualitat de les edificacions, pel que fa a la mà d'obra, materials i tècniques de construcció varia en funció del lloc en què es realitzen les construccions.

Alçada	Any de Construcció					
	Fins 1950		1951-1970		> 1970	
	Àrea		Àrea		Àrea	
	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
< 5 plantes	20% A	30% A	5% A	15% A	85% C	5% A
	80% B	70% B	50% B	70% B		15% 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
>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 3. Classificació dels edificis de Catalunya agrupats segons edat, altura i situació urbana en diferents percentatges de classes de vulnerabilitat de l'EMS-92 (segons Chávez, 1998).

Aplicant aquesta classificació a tots els edificis de Catalunya s'ha obtingut que la majoria d'ells corresponen a les classes de vulnerabilitat B i C, amb 40 i 45% respectivament. Per tant, els menors percentatges corresponen a les classes de vulnerabilitat, més i menys vulnerable, A i D, amb una representació de 9 i 6% cadascuna.

La mateixa classificació fou també aplicada a cadascun dels municipis de Catalunya, obtenint-se els percentatges de les classes de vulnerabilitat A, B, C i D presents a cada municipi.

Com exemple, a la figura 7 es mostra la distribució de la classe C per a tots els municipis de Catalunya. Arriba a percentatges que oscil·len entre 65% i 81% , els quals s'observen en més de 50 municipis. El rang observat en la majoria de municipis està comprès entre 33% i 48%.

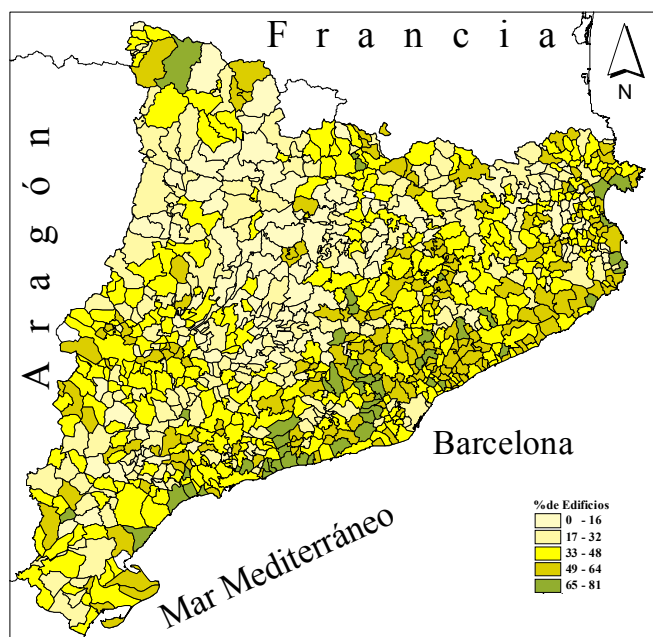


Figura 7. Distribució de la classe de vulnerabilitat C (segons Chávez, 1998).

4. ESTIMACIÓ DE DANYS

S'ha dut a terme una estimació dels danys que poden experimentar els edificis dels diferents municipis de Catalunya, considerant les intensitats previstes en el mapa de zones sísmiques presentat en la figura 6. A més, com a resultat del dany causat als edificis s'ha realitzat un escenari de les conseqüències per a la població de cada municipi.

Estimació del dany als edificis

Per a l'estimació del dany que podrien experimentar les edificacions d'habitatge dels diferents municipis, s'ha considerat per a cada municipi la intensitat determinada en el mapa de zones sísmiques representat a la figura 6. S'ha realitzat mitjançant l'ús de matrius de probabilitat de danys que han estat determinades per les classes de vulnerabilitat A, B, C, D, E i F, els graus de danys de 0 (no dany) a 5 (col·lapse total) i els graus d'intensitat (de VI a X) de l'escala EMS-92 (Chávez, 1998; Chávez et al., 1998).

Com a resultat de l'avaluació del dany físic s'obté el nombre d'edificis de cada municipi distribuït segons els diferents graus de danys.

A partir del dany experimentat pels edificis s'ha fet una estimació dels que podrien quedar en condicions inhabitables, considerant-se en aquest estat aquells que sofreixin els graus de danys 4 i 5 així com un 50% dels que experimenten dany 3. Aquests resultats són de màxima importància per a l'avaluació del nombre de persones que poden quedar sense habitatge després de l'acció del terratrèmol.

Per una altra banda s'ha fet una classificació dels municipis segons la distribució dels diferents graus de dany, amb l'objectiu de presentar una visió global del deteriorament per municipis. En aquest ordre, s'han determinat tres grups de danys: lleu, moderat i greu. Aquests grups es defineixen en funció de les variacions dels percentatges de danys lleus (PL), moderats (PM) o greus (PS) en els diferents municipis.

En resum, es consideren com municipis seriosament danyats aquells que tenen més del 37% dels seus edificis amb danys moderats o greus; moderadament danyats els que tenen de 20% a 37% dels seus edificis amb dany moderat o greu i lleugerament danyats els que tenen menys del 20% d'aquestes categories.

A la figura 8 es presenta el resultat d'aplicar aquest procediment. En aquest mapa s'observa una gran concentració dels danys greus a la part nord de la regió, la qual arriba al voltant del 26% dels municipis de Catalunya; el contrari a aquesta situació es presenta a la part sud, on es localitzen els danys lleus, observats al major nombre de municipis, corresponent a quasi el 50% del total. A la porció central de la regió, al 24% de la resta de municipis, es troben els danys moderats.

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 disponibles de terratrèmols ocorreguts en d'altres indrets (Coburn et al., 1992; ATC-13,1985) i dels resultats de les estimacions d'edificis danyats, que s'han exposat anteriorment, acompanyades de les dades del cens de població.

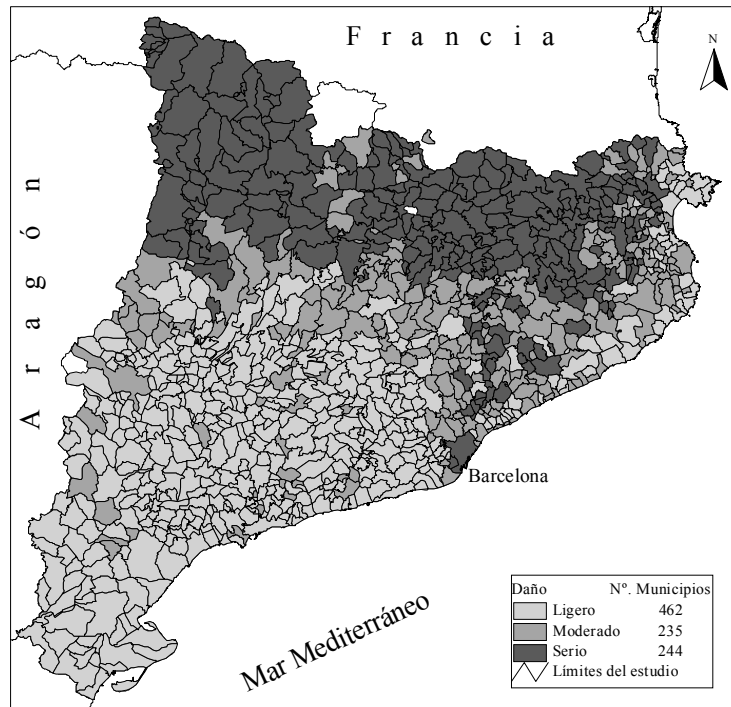


Figura 8. Classificació dels municipis de Catalunya segons els danys potencials (segons Chávez, 1998)

Les dades dels cens de població de l'any 1996, juntament amb el cens d'edificis permet fer una estimació del nombre mitjà de persones per edifici a cada un dels municipis de Catalunya. Com resultat s'obté que a 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.

Tot fent una gran simplificació del problema s'ha realitzat una estimació molt aproximada del nombre de persones que podrien ser afectades amb diferent gravetat a cada municipi.

Els habitants de les quasi dues terceres parts del nombre total dels municipis de Catalunya es veurien poc afectats per un terratrèmol, menys de 100 persones per municipi; un nombre important de municipis es trobaria entre 100 i 1000 persones. Molt pocs superarien aquesta quantitat.

Estimació de les pèrdues econòmiques directes

S'ha realitzat tenint en compte el dany potencial als edificis. S'obté a partir del producte del percentatge de dany sofert per l'edifici i el seu valor de reposició.

Els resultats obtinguts mostren pèrdues inferiors a 100 milions de pessetes pels municipis de la part central de Catalunya. Un gran nombre de municipis tindrien entre 100 i 1000 milions de pèrdues. Per a uns pocs municipis les pèrdues podrien ser superiors a 10,000 milions de pessetes.

5. ZONACIÓ SÍSMICA DE LA CIUTAT DE BARCELONA

Fins aquí s'han considerat els aspectes de l'avaluació del risc sísmic que poden ser tractats a escala regional i que per tant, donen lloc a una zonificació del territori a aquesta escala. És interessant en molts casos realitzar estimacions del risc a escales majors, com pot ser l'estudi d'una ciutat o dels seus districtes o, més encara, d'edificis individuals.

Dos aspectes de l'anàlisi del risc poden tenir un tractament específic segons l'escala de l'anàlisi que es vulgui realitzar:

- els efectes d'amplificació local del moviment del sòl degut a la presència de sòls tous o de topografies abruptes, i
- la consideració de la vulnerabilitat sísmica dels edificis i els escenaris de danys.

Tècniques d'avaluació dels efectes locals

En general la modelització de l'efecte del sòl es fa a través de l'estimació de la funció de transferència, que consisteix en la relació espectral entre un registre en un emplaçament donat i un registre situat en un emplaçament de referència, que acostuma a ser roca dura. També pot tenir importància l'augment de la duració de l'acció sísmica.

Els mètodes poden classificar-se en dos grans grups: numèrics i experimentals.

- Mètodes numèrics: Quan es disposa d'informació de les característiques dinàmiques del subsòl de l'emplaçament o de l'àrea d'estudi, els efectes locals poden estimar-se a partir de càlculs numèrics.

- Mètodes experimentals: Poden basar-se en diferents tipus de dades: observacions macrosísmiques, mesures amb registres instrumentals de terratrèmols i mesures de soroll sísmic (microtremors).

Vulnerabilitat sísmica i escenaris de danys a escala local.

En funció del grau de detall de l'estudi que es vulgui realitzar i de la informació disponible sobre les característiques estructurals i constructives de les edificacions d'una ciutat, es poden aplicar diferents metodologies.

Així, per a un resultat de tipus estadístic, sense individualitzar els resultats per a cada edifici, es pot adoptar una metodologia del tipus presentat al capítol 3, desenvolupada inicialment per a una escala regional, on serà suficient conèixer les dades relatives al cens d'edificis i de la població i utilitzar matrius de probabilitat de dany adequades.

Si es volen afinar més els resultats i arribar a conèixer la vulnerabilitat i l'escenari de danys edifici per edifici, serà necessari en aquest cas disposar d'informació individualitzada per a cada edifici i aplicar una metodologia que permeti caracteritzar la vulnerabilitat i el grau de dany específics a cada situació, com pot ser el mètode de l'índex de vulnerabilitat, proposat a Itàlia per Benedetti i Petrini (1984) i Angeletti et al., (1988).

Per edificis d'especial importància degut a la funció que realitzen o bé perquè pertanyen al patrimoni històric o pel rics intrínsec que suposen, serà necessari un anàlisi individualitzat utilitzant mètodes propis del càlcul d'estructures, en el que es poden fer intervenir un número important de paràmetres per tenir en compte particularitats estructurals, com per exemple el comportament dúctil. No entrarem a descriure aquests mètodes, l'aplicació dels quals és molt costosa per conjunts grans d'edificacions.

Aplicació a la ciutat de Barcelona

Presentem alguns dels resultats dels estudis de la zonació sísmica de la ciutat de Barcelona.

La zona on se situa la ciutat de Barcelona es considera d'activitat sísmica moderada i està catalogada amb una intensitat VI MSK per a un període de retorn de 500 anys per la Norma Sísmica Espanyola (NCSE-94,1995). Estudis recents (Secanell et al., 1999) avaluen aquesta intensitat com VI-VII MSK per a materials terciaris aflorants a la ciutat, tal com s'ha presentat en el capítol 2, figura 4. La presència d'una cobertura Quaternària (Pleistocena-Holocena), sobre la qual se cimenten pràcticament la totalitat dels edificis de la ciutat, pot produir un augment considerable del moviment del sòl, fent necessària l'avaluació d'aquesta possible ampliació, donada l'alta densitat de població i l'alt índex de vulnerabilitat de les construccions.

La ciutat de Barcelona se situa sobre el peudemont de la Serra de Collserola, que pertany a la Serralada Costanera Catalana, de direcció aproximadament paral·lela a la línia de costa, i està limitada al NE pel delta del riu Besòs i al SW pel delta del Llobregat. Podem distingir dues unitats geomorfològiques: i) els relleus muntanyencs que constitueixen el substrat de la ciutat, en els que trobem materials Paleozòics (metamòrfics i granítics) i els Terciaris de Montjuïc i ii) el pla de Barcelona, dividit a la vegada en unes

altres dues unitats geomorfològiques: la zona central de la ciutat composta de materials d'edat Pleistocena, i els dipòsits deltàics dels rius Besòs i Llobregat, composts per materials recents d'edat Holocena.

Per a l'estimació d'efectes locals s'han portat a terme, per una part, treballs de simulació numèrica considerant com a dades d'entrada les característiques dels sòls, obtingudes a partir d'una recopilació i anàlisi de dades geotècniques, i per una altra part, diverses campanyes de mesura experimental de la freqüència fonamental pel mètode de Nakamura (1989).

Informació geotècnica i simulació numèrica d'efectes del sòl

Diferents paràmetres dinàmics dels sòls són necessaris per a la simulació numèrica dels efectes que aquests produeixen en la propagació de les ones sísmiques. Cid (1996) va definir i va utilitzar una metodologia que permet estimar els paràmetres dinàmics dels sòls a partir dels paràmetres geotècnics usuals en l'obra pública, solucionant així el problema de l'absència general de valors experimentals de les propietats dinàmiques dels sòls per a Barcelona. De l'assaig de penetració estàndard (SPT) o d'altres assaigs de penetració es dedueix una columna de sòl amb un valor N homogeni per a cada capa, amb sentit representatiu, estimatiu i estocàstic de cada emplaçament. En total es van analitzar 184 sondeigs geotècnics amb un resultat de 70 columnes representatives, presentades a la figura 9.

En general, la informació geotècnica no està disponible per a profunditats majors de 20 metres. Encara que a la zona alta de la ciutat trobem el basament Paleozòic a profunditats menors de 20 metres, és suficient la informació geotècnica per definir un model de capes planes. Malgrat tot, a mesura que ens apropem a la línia de costa, ens trobem amb un augment del gruix de materials Terciàries. La base del Terciari no és accessible als estudis geotècnics degut a la seva gran profunditat. Per això s'han fet servir uns resultats preliminars d'estudis d'inversió de prospecció gravimètrica detallada, que permeten estimar d'una forma preliminar la profunditat del sostre Paleozòic (Lázaro et al., 1998). L'estimació del sostre Terciari està basada en informació geotècnica i en extrapolacions geològiques fonamentades bàsicament en el mapa geotècnic de la ciutat de Barcelona (Losan, 1978). Un cop definit el gruix de les capes fins al basament Paleozòic, és necessari definir els paràmetres dinàmics de la resta de la columna on no hi ha sondeig geotècnic. Aquests paràmetres dinàmics han estat estimats en base a diversos factors com profunditat, litologia i grau d'alteració.

Un cop definits els models dinàmics unidimensionals del subsòl en els diferents punts d'estudi, així com el nivell de deformació de cisalla a la qual serà sotmès el subsòl a partir d'una sèrie de polsos de Ricker, s'ha seleccionat el mètode lineal-equivalent Shake'91 (Idriss i Sun, 1992), degut al seu nivell d'estandardització i a les condicions locals de la zona d'estudi. Per analitzar el grau d'incertesa dels resultats s'ha utilitzat un procés de Montecarlo (500 càlculs). Les corbes de variació, per a diferents tipus de materials, del mòdul de cisalla dinàmic (G) normalitzat al mòdul de cisalla dinàmic màxim ($G_{m\acute{a}x}$) i de la raó d'esmoreïment (D) respecte la deformació de cisalla que seran utilitzades al càlcul, estan basades en dades experimentals obtingudes a Grècia a la vall de Volvi (Cid, 1998).

S'han obtingut les funcions de transferència entre la superfície i el basament (considerat aflorant) per a diferents senyals d'entrada a cadascú dels 70 punts d'estudi, considerant el resultat mitjà de 500 càlculs, resultat de la incorporació d'un procés de Montecarlo. Aquests resultats permeten realitzar una classificació en tres grups, corresponents a 3 àrees geogràfiques de la ciutat (Cid, 1998, Cid et al, 1999).



Figura 9. Velocitats de cisalla per a 70 columnes representatives de la ciutat (segons Cid, 1998)

A la figura 10 s'han representat les funcions de transferència representatives de cada zona, les quals corresponen al valor mitjà de les funcions de transferència relatives a materials terciaris aflorants a la ciutat (emplaçaments de referència).

D'aquesta forma, cadascuna de les zones definides posseeix les següents característiques:

- Zona I, afloraments holocens. La funció de transferència presenta un pic d'amplificació màxima pròxim a 2.5 Hz, amb un valor d'amplificació entorn a 2.5.
- Zona II, afloraments pleistocens amb un substrat Terciari de gruix el suficientment gran com perquè influeixi en la resposta. La funció de transferència presenta un pic d'amplificació màxima pròxim a 5 Hz, amb un valor d'amplificació entorn a 2.5.
- Zona III, afloraments pleistocens sense substrat Terciari de gruix suficient com perquè influeixi en la resposta. La funció de transferència presenta un pic d'amplificació màxima pròxim a 5 Hz, amb un valor d'amplificació entorn a 2.25, i una desamplificació de les baixes freqüències.

De la consideració d'aquestes tres zones definides i la zona que quedaria definida pels afloraments rocosos (Zona 0) obtenim la zonació sísmica de la ciutat de Barcelona que es presenta a la figura 11. L'increment del nivell d'acceleració màxim respecte l'emplaçament de referència és el següent: Zona 0, 1; Zona I, 1.69; Zona II, 1.65; i Zona III, 1.43.

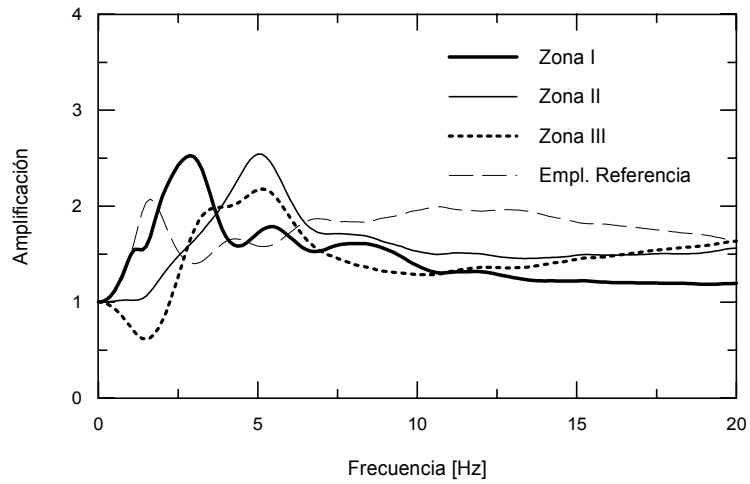


Figura 10. Funcions de transferència representatives de cada una de les zones definides i funció de transferència de l'emplaçament de referència (segons Cid, 1998).

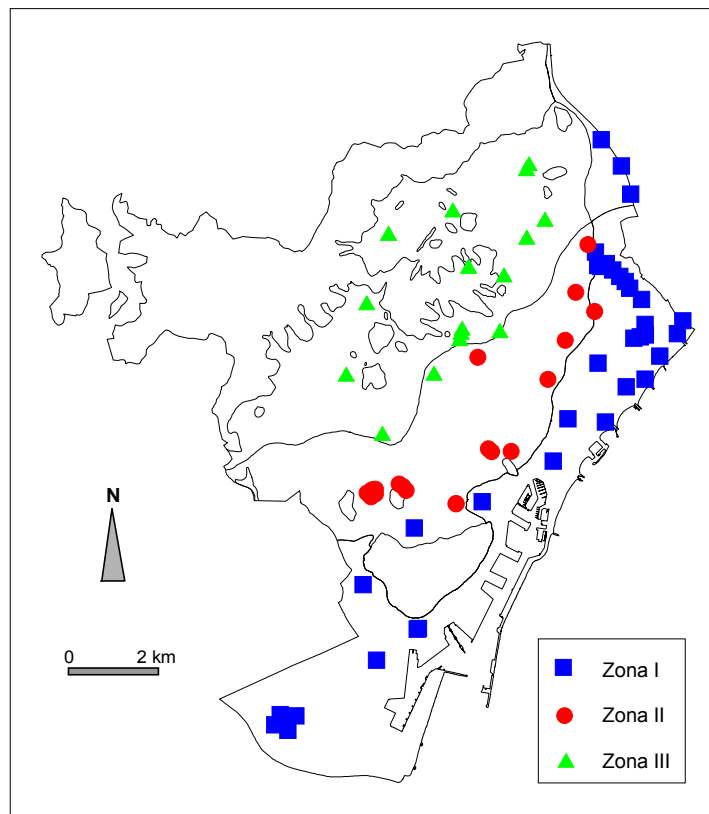


Figura 11. Situació dels 70 punts d'estudi que defineixen la zonació sísmica de la ciutat de Barcelona (segons Cid, 1998).

Mesures experimentals pel mètode de Nakamura

Per a l'estimació dels períodes predominants del sòl s'ha utilitzat el mètode de Nakamura (1989), que a partir de registres de soroll ambiental en superfície determina el període fonamental de les capes de sòl des del basament rocós a la superfície, mitjançant la relació entre l'espectre de Fourier de la component horitzontal i el de la component vertical del mateix registre.

Es van realitzar unes 200 mesures amb l'obtenció dels períodes fonamentals del sòl de Barcelona, que cobreixen els diferents tipus de materials (Alfaro et al, 1998). A la figura 12 es mostra un mapa amb els valors de períodes obtinguts.

Els períodes pels afloraments rocósos paleozòics del Tibidabo i Collserola són força homogenis i presenten un valor de 0.06 s. Això es deu a que no és roca completament sana, sinó que té fins a 2 metres de material meteoritzat que el cobreix (Losan, 1978), i amb velocitats de cisalla majors que a d'altres sòls.

Per una altra part, els períodes predominants de l'aflorament terciari de Montjuïc són heterogenis, van des de valors de 0.09 s fins 0.91 s. Això pot ser degut a que aquesta zona s'ha explotat com a cantera, i s'ha omplert amb materials de qualitats ben diferenciades.

El material Cuaternari del Pla de Barcelona és el més heterogeni de tots; això es deu als canvis de gruix, que van de zero, al peu de muntanya del Tibidabo-Collserola i Montjuïc a profunditats mitges de 20 m, amb petites zones amb profunditats de fins 50 m. A més està tallat a innumerables llocs per rieres que van de la Serra al Mediterrani. Els períodes resultants estan en relació amb aquesta morfologia, amb valors que van de 0.10, 0.20 o 0.30 s a les zones de major pendent (Zona III de la figura 12) a períodes majors de 0.70 s a la major part del Pla (Zona II).

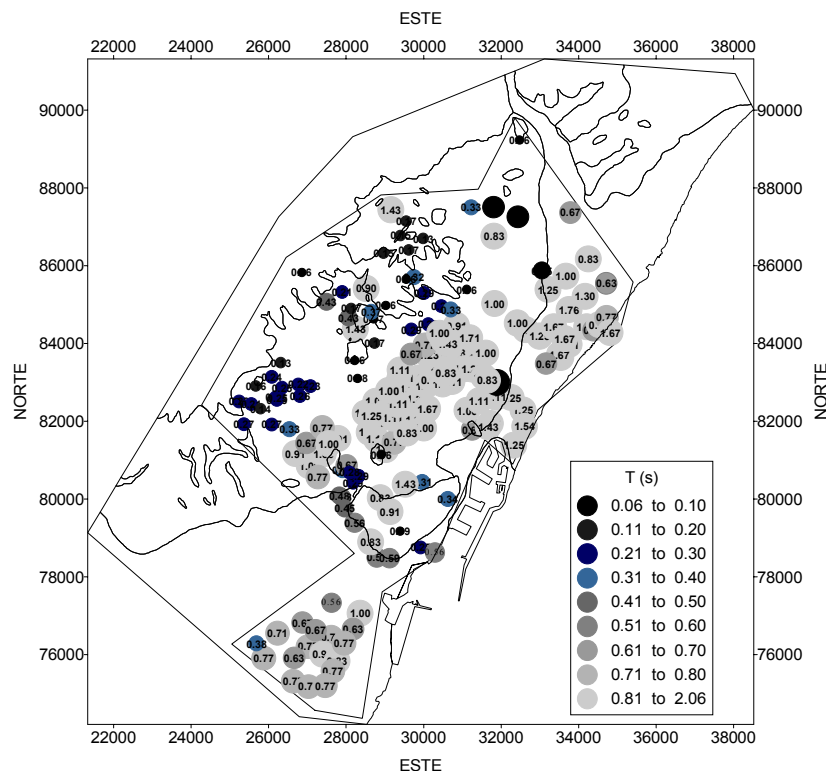


Figura 12. Períodes predominants dels sòls de Barcelona (segons Alfaro, 1998).

Els materials del delta del Besòs (Zona I) presenten períodes predominants superiors a 0.50 s arribant fins i tot al màxim valor registrat de 2.1 s. Finalment la Zona Franca (també Zona I), ubicada sobre el delta del Llobregat, presenta una gran homogeneïtat dels resultats obtinguts, amb un període mitjà de 0.72 s.

Comparació de la simulació numèrica amb els resultats experimentals mitjançant la tècnica de Nakamura

Per a l'aplicació de tècniques de simulació numèrica és precís disposar d'un bon model del subsòl i, en particular del màxim d'informació possible sobre els paràmetres geotècnics del sòl, inclosos resultats d'assaigs dinàmics, no sempre disponibles. El nivell de desconeixement d'aquests paràmetres va influir lògicament en la qualitat de les simulacions. Per una altra part, els mètodes experimentals no estan lliures d'un alt grau d'incertesa. En particular el mètode de Nakamura dóna en general bones estimacions del període fonamental del sòl, però no dels factors d'amplificació. En particular a la Zona II, part central del Pla de Barcelona, els valors trobats amb el mètode de Nakamura ($T > 0.7$ s) difereixen significativament dels valors del període corresponent a la màxima amplificació ($T \approx 0.25$ s) deduïts de les simulacions de la funció de transferència. A Goula et al. (1998) i a Susagna et al. (1998) es pot trobar una discussió sobre les diferències entre els resultats obtinguts amb la tècnica de Nakamura que proporciona el valor del període fonamental, però no del període de màxima amplificació, que en el cas d'aquesta zona correspon a harmònics superiors.

És per això recomanable en tot treball de microzonació sísmica no utilitzar un únic mètode. La millor solució és combinar tècniques numèriques amb mesures experimentals.

Avaluació de la vulnerabilitat sísmica i escenaris de dany a escala local

S'han portat a terme diferents estudis de vulnerabilitat de la ciutat de Barcelona utilitzant diferents metodologies. Aquí comentarem els que utilitzen matrius de probabilitat de dany i índexs de vulnerabilitat. A més s'han realitzat estudis amb d'altres aproximacions, com per exemple, la mesura experimental dels períodes de vibració d'edificis (Espinoza, 1999).

La ciutat de Barcelona posseeix 68904 edificis segons el cens realitzat per l' Institut d'Estadística de Catalunya en 1990, repartits en 10 districtes i amb una densitat de població mitja de 15000 habitants /km².

L'aplicació de la classificació d'edificis en classes de vulnerabilitat A, B, C i D de l'escala EMS-92, als edificis de la ciutat de Barcelona, dóna com a resultat la distribució següent: 18% de classe A; 61% de classe B; 20% de classe C i 1% de classe D (Chávez, 1998). Això significa que la gran majoria d'edificis d'habitatge de Barcelona pertanyen a una classe de vulnerabilitat alta (18%) i mitjana - alta (61%), mentre que la resta es troba a les categories mitjana - baixa (20%) o baixa (1%). Si es realitza aquesta classificació per districtes, la classe predominant a tots ells és la classe B, amb percentatges que oscil·len entre el 54% i el 66%. La classe A té una major presència en els districtes amb edificis més antics (Ciutat Vella i l'Eixample). La classe C, vulnerabilitat mitjana - baixa, té una major presència en els districtes amb construccions més recents, com per exemple Nou Barris amb un 31% de edificis, en front a un 3% a Ciutat Vella.

Com a resultat d'aplicar les matrius de probabilitat de dany, pròpies de l'escala EMS-92, per valors d'intensitat VI, valor atribuït per la Norma Sismoresistent NCSE-94 o bé VII, considerant estudis més recents (Secanell et al, 1998; Secanell, 1999) s'obtenen els següents resultats: per a la intensitat VI aproximadament el 97% d'edificis no sofririen danys o només danys lleugers (graus 0, 1 y 2) i el 3% restant, danys greus (graus 3, 4 o 5). Per a la intensitat VII el percentatge de danys greus augmentaria aproximadament al 12%. Els majors percentatges d'edificis danyats greument es tindrien en els districtes de Ciutat Vella i l'Eixample.

Amb aquesta metodologia es pot obtenir una estimació de les persones que resultarien afectades en menor o major mesura a cada districte, si bé la imprecisió d'aquestes estimacions resulta molt elevada, degut a les diferents hipòtesis que poden ser considerades. S'ha pogut igualment realitzar una estimació de les pèrdues econòmiques directes degudes als danys als edificis, donant de l'ordre de 0,2 bilions de pessetes - de 1998- per a una intensitat VI i de 0,56 bilions per a una intensitat VII.

El mètode de l'índex de vulnerabilitat, proposat per Benedetti i Petrini (1984) està basat també en observacions de danys produïts per terratrèmols a Itàlia. El mètode consisteix en identificar els paràmetres més importants que controlen el dany en cas de terratrèmol. Així l'estudi de la configuració en planta i elevació, el tipus de cementació, els elements estructurals i no estructurals, l'estat de conservació, el tipus i qualitat dels materials, etc. En total 11 paràmetres són qualificats a una escala

numèrica, afectada per un pes, que tracta de tenir en compte la importància relativa dels diferents paràmetres involucrats. A partir de la suma ponderada dels valors atribuïts s'obté un índex de vulnerabilitat I_v , amb valors que van de 0 a 382,5 pels edificis d'obra de fàbrica. Un mètode similar és també usat pels edificis de formigó.

Per altra banda es defineix un índex de dany global D, caracteritzat per l'estat estructural d'un edifici complet després d'un terratrèmol, com la combinació ponderada dels valors que descriuen l'estat post-terratrèmol dels diferents components estructurals, com elements verticals i horitzontals, murs i components no estructurals. El resultat és un valor comprès entre 0% i 100%.

S'empren funcions de vulnerabilitat, que han estat desenvolupades de manera empírica a partir de l'observació de danys (Angeletti et al., 1988) o per la seva simulació en el cas de disposar de poques dades, com és el cas d'edificis de formigó (Yépez et al., 1995).

Aquesta metodologia fou aplicada a una zona de Barcelona corresponent a nou illes de l'Eixample (Caicedo et al., 1994; Yépez, 1996) composta per 181 edificis d'obra de fàbrica, 14 de formigó amb bigues i 23 de formigó amb lloses planes. Dels resultats obtinguts es conclou que aproximadament el 22% dels edificis presenten una vulnerabilitat alta o molt alta; el 70% és classificat com de vulnerabilitat mitjana o mitjana - baixa i només el 8% és considerat de vulnerabilitat baixa. Pel que fa al dany esperat per a la intensitat VII, s'observa un 2% de edificis amb danys superiors al 40% ; en el 11% dels edificis analitzats s'esperarien índexs de danys que van del 20% al 40%; en el restant 87% d'edificis l'índex de dany seria inferior al 20%. Actualment s'estan estenent aquests estudis a tota la ciutat de Barcelona (Mena, 2001).

Cal assenyalar que l'ús de sistemes d'Informació Geogràfica és de gran utilitat en aquests treballs ja que permet crear diferents capes d'informació i individualitzar els resultats per a cada edifici o grup de edificis.

6. SERVEI D'INFORMACIÓ SÍSMICA DE L'INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA (ICC)

El Servei Geològic de Catalunya opera des de l'any 1985 una xarxa sísmica regional amb la finalitat d'estudiar la sismicitat de Catalunya i àrees veïnes (Pirineus Orientals i Mar Mediterrània). La xarxa ha augmentat progressivament el nombre d'estacions des de 1985, començant per estacions analògiques curt període, d'una component fins l'actualitat, amb una dotzena d'estacions que utilitzen diversos sistemes de comunicació i d'enregistrament digital. Les determinacions hipocentrals de sismes en un àrea centrada a Catalunya ha estat possible amb la incorporació de dades de més estacions regionals pertanyent a altres institucions. Aquestes determinacions es publiquen sense interrupció al Butlletí Sismològic anual des de 1984 (SGC, 1984-1994; SGC/ICC, 1995- 1999).

A l'any 1996 un nou concepte de xarxa sísmica va ser dissenyada i planificada des de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) amb dues idees mestres: i) donar un servei d'informació sísmica ràpid a Protecció Civil i a la societat en general i ii) obtenir dades sísmiques de qualitat per a la comunitat científica.

El projecte consisteix en la instal·lació d'una vintena d'estacions, amb infraestructures molt sòlides i amb equips d'alt rendiment composts de sensors de tres components "broad-band" amb un gran marge dinàmic. Les estacions estan basades en plataformes VSAT, que envien les dades sísmiques en continu i en temps quasi-real, via satèl·lit, al Hub, del Centre de Recepció de Dades de l'ICC. Les dades es processen amb un programari de detecció d'events i de localització automàtica. La informació sobre els terratrèmols enregistrats, després de validar-se per sismòlegs, es distribueix via Internet a la nostra pàgina web: www.icc.es.

En cas de produir-se un terratrèmol percebut per la població s'emeta un comunicat urgent a una llista de destinataris, responsables de les administracions, centres sismològics i medis de comunicació amb la localització del terratrèmol i la seva magnitud. En l'actualitat (juliol 2001) es disposen de 5 estacions operatives. En un futur proper, amb major número d'estacions, el primer comunicat a Protecció Civil serà quasi instantani i es completarà amb una estimació de la percepció del terratrèmol i dels eventuals danys causats.

Nova Xarxa Sísmica Broad-Band amb comunicació satèl·lit

El projecte d'implantació de la xarxa sísmica es proposa en tres fases, tal com s'indica en el mapa de la figura 13. Des de 1999, les tres primeres estacions VSAT amb sensors Guralp CMG-40T són operatives (núm. 1, 2, 3 a la figura 13), junt amb el centre de recepció i procés de les dades.

En una segona fase, s'han instal·lat 2 noves estacions (núm. 4 i 5) amb sensors STS-2 i CMG-3ESP. Tres altres estacions estan en construcció (núm. 6, 7 i 8). En una tercera fase s'instal·laran 12 estacions més. A més es projecte compartir dades d'estacions d'altres organismes, com l'Observatori de l'Ebre, l'Institut d'Estudis Catalans, l'Institut d'Estudis Andorrans, etc.

Es dedica un esforç important a la selecció d'emplaçaments i en el disseny i construcció dels diferents elements de les estacions remotes, per tal de tenir estacions fiables, robustes, duradores i amb baix soroll sísmic. A la figura 14 es mostra una vista de l'estació d'Organyà (CORG), amb el pou sísmic, la caseta de la instrumentació, els panells solars i l'antena VSAT. Totes les estacions disposen de proteccions elèctriques i ambientals d'un gran rendiment. S'obtenen enregistraments de gran qualitat, com es pot observar a la nostra pàgina web.



Figure 13. Fases d'implantació de la xarxa sísmica VSAT.



Figure 14. Vista de l'estació sísmica d' Organyà.

La xarxa VSAT consta d'una unitat central d'adquisició de dades a Barcelona, i d'estacions remotes distribuïdes pel territori (xarxa LIBRA VSAT, de la societat Nanometrics, Canadà).

El Hub i les estacions remotes es comuniquen via el satèl·lit geostacionari Hispasat 1, fent servir un ample de banda de 100kHz a una velocitat de 112kbps. El sistema utilitza la mateixa portadora per al flux de dades tant d'entrada com de sortida, minimitzant l'ampla de banda necessari (figura 15).

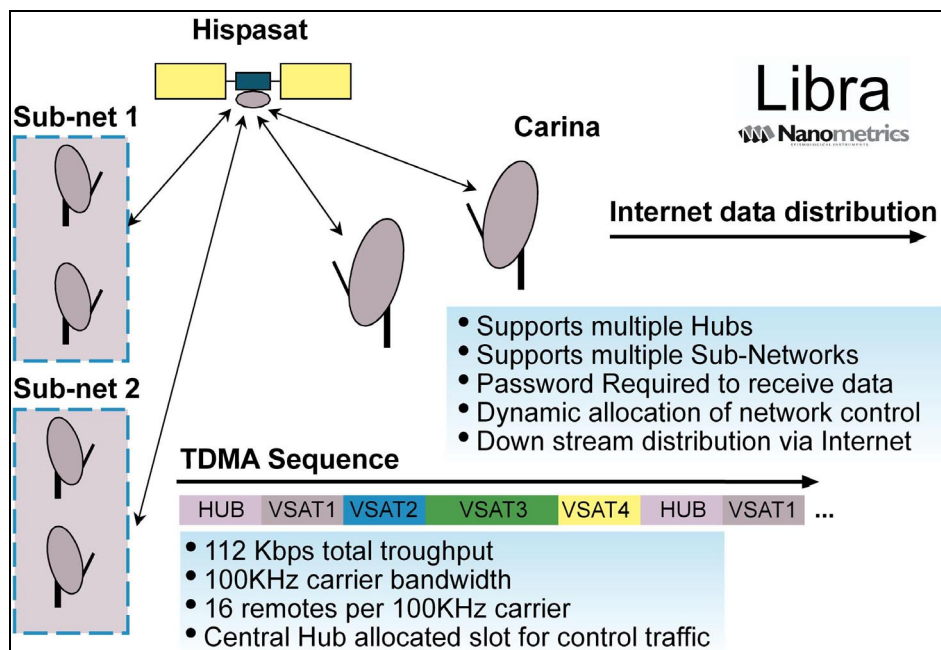


Figure 15. Xarxa Libra VSA.

Cada estació de la xarxa (Hub i remotes) té assignat un "slot" dins d'un protocol de múltiple accés en el domini temporal (TDMA) i només transmet quan té l'autorització. A cada estació remota un digitalitzador HRD24 de Nanometrics rep el senyal digital d'un sensor broad-band, el mostreja a 100 mostres per segon i condueix les dades cap a l'antena VSAT.

Les dades s'envien al Hub central, amb un protocol UDP/IP i una capçalera (NMXP) que conté un número de seqüència únic. Quan les dades arriben al Hub es controla la continuïtat dels números de seqüència i si falten dades hi ha un requeriment automàtic de retransmissió per part de al Hub a l'estació remota. Les dades es guarden a les remotes en "ringbuffers" de 2,5 hores de capacitat, per permetre ser retransmeses en cas de necessitat.

Al Centre de Recepció de Dades Sísmiques de Barcelona les dades passen del 'Hub per una xarxa LAN a un PC on s'arxiven les dades en un "ringbuffer" de gran capacitat.

Terratrèmols recents

A la pàgina web de l'ICC, www.icc.es a l'apartat terratrèmols recents es pot trobar la informació relativa als terratrèmols enregistrats per la Nova Xarxa, classificats en locals, regionals i telesismes i ordenats pel mes de l'any. S'actualitza aquesta informació diàriament amb les localitzacions dels sismes locals i la visualització dels enregistraments dels sismes locals, regionals i telesismes realitzats a les estacions Broad-Band de la nova xarxa. Els arxius que contenen les formes d'ona poden baixar-se en format SEED (zipejat). A la figura 16 es mostra un exemple de la visualització dels enregistraments d'un petit sisme localitzat a Andorra el mes de juliol de 2001.

Comunicat en cas de terratrèmol percebut per la població

En cas de produir-se un terratrèmol percebut per la població a Catalunya s'emet un comunicat urgent a una llista de destinataris, responsables de les administracions, centres sismològics i medis de comunicació amb la seva localització i magnitud i un mapa de situació amb la toponímia oficial de Catalunya.

Andorra MI=0.8 (ICC)
2001-07-02_21:12:00.0077

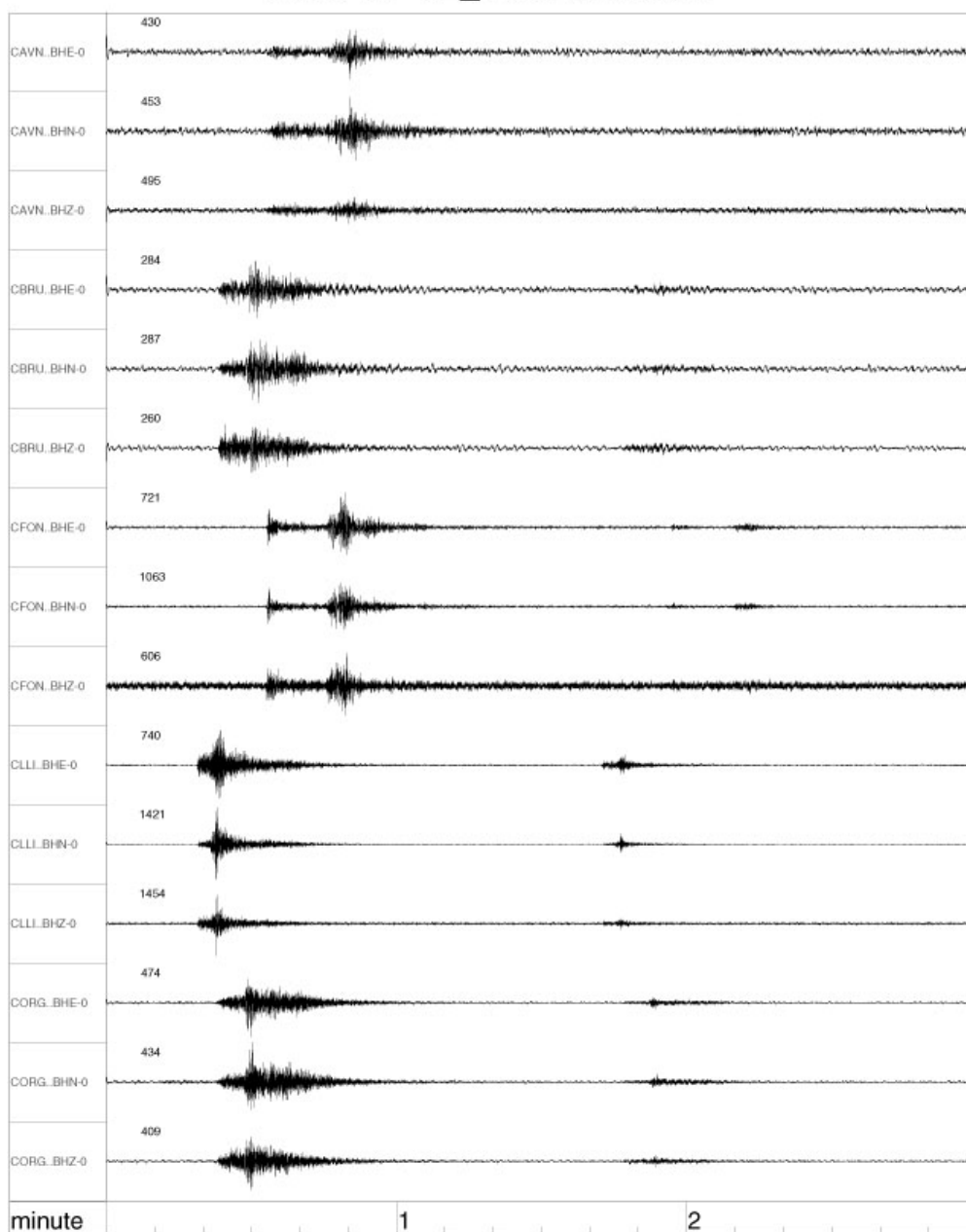


Figura 16. Visualització dels enregistraments obtinguts a les estacions de la Nova Xarxa Sísmica del sísmes del 2/07/2001, $M=0.8$, amb epicentre a Andorra.

A la figura 17 es mostra un exemple amb l'últim comunicat del dia 3 de juny de 2001, d'un sísmes percebut lleugerament al Bergadà.

Barcelona 03/06/2001

Informació del terratrèmol del dia 3 de juny de 2001

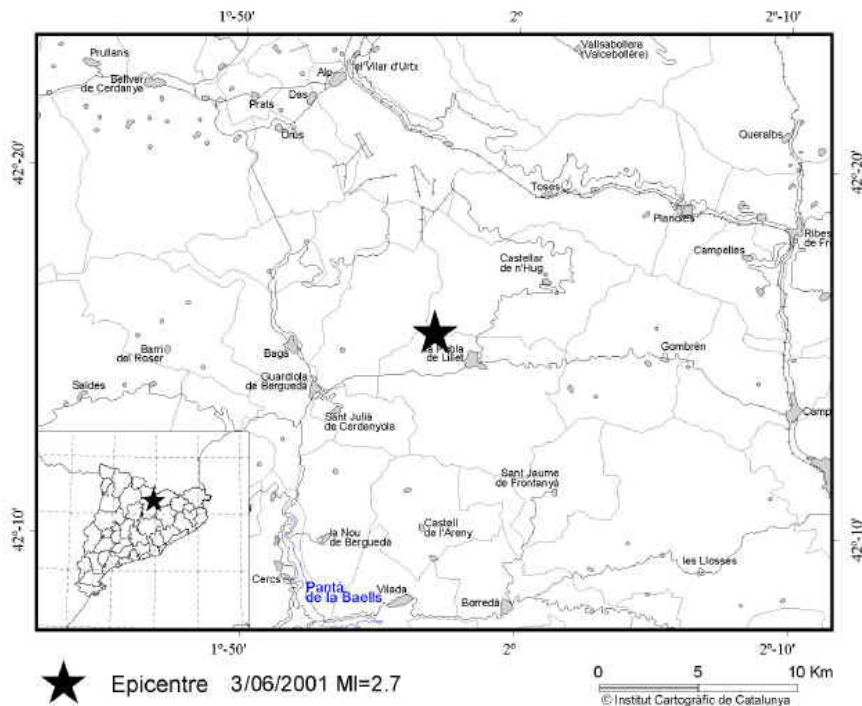
La localització provisional de l'epicentre efectuada amb els enregistraments actualment disponibles a l'Institut Cartogràfic de Catalunya és la següent:

HORA ORIGEN (Temps oficial): 01h 02m 49s	MAGNITUD: 2.7
LATITUD: 42°16' NORD LONGITUD: 1° 57' EST	PROFUNDITAT: 10km

ZONA EPICENTRAL: Berguedà

Repercussió del sisme en funció de la magnitud:

M=3-4 Percebut a prop de l'epicentre. Sense danys. **M=4-5** Percebut a gran part del territori. Possibles danys lleugers. **M=5-6** Percebut a tot el territori. Danys probables.



Per a més informació podeu consultar la pàgina d'internet: <http://www.icc.es/sismes>
Institut Cartogràfic de Catalunya. Parc de Montjuïc E-08038-Barcelona Telèfon 34-3-5671500 Fax 34-3-5671567

Figura 17. Exemple de comunicat corresponent al sisme del dia 3/06/2001 de M=2.7, al Berguedà.

Simulació dels efectes produïts per un terratrèmol

Quan es produeix un terratrèmol, és important per a l'organització de l'emergència de disposar d'una estimació ràpida de les possibles conseqüències sobre les persones, serveis i edificis. S'ha posat a punt a l'ICC un procés de càlcul automàtic basat en el coneixement de la posició i magnitud del sisme i en les dades bàsiques del cens d'edificis i de població (González, 2000; González et al., 2000), que permet una avaluació de les possibles intensitats percebudes als diferents municipis, del possible número de persones que han percebut el sisme i de l'àrea afectada per a cada intensitat. Si el terratrèmol tingués una intensitat elevada, com per a produir danys el mètode també permet realitzar una estimació dels danys als edificis, de les persones que resultarien afectades i dels possibles danys personals i de les pèrdues econòmiques.

El mètode consta de tres etapes, totes elles automatitzades:

- i) estimació de la intensitat epicentral, a partir de les dades de localització i magnitud subministrades per la xarxa sísmica. S'ha utilitzat una relació empírica ajustada amb dades regionals de sismes recents.
- ii) estimació de les intensitats per a cada municipi a partir d'una expressió de la disminució de la intensitat en funció de la distància epicentral, ajustada amb dades d'intensitat puntual, recollides els darrers anys tant per a sismes recents, com per a terratrèmols històrics. Aquesta simulació permet donar una estimació ràpida de les localitats que han percebut el sisme amb diferents intensitats,
- iii) escenaris de danys susceptibles de produir-se, si el terratrèmol arriba a una intensitat V (MSK). Per fer aquests càlculs s'han utilitzat els desenvolupaments mostrats en el capítol 3, "Estimació de danys", basats en els treballs de Chávez, (1998) i Chávez et al. (1998).

Com exemple del procés, es presenta a la figura 18 l'escenari realitzat pel terratrèmol del 18 de febrer de 1996 de M=5.2, amb una intensitat a San Pau de Fenolhet prop de l'epicentre de VI-VII. Es compara el resultat de la simulació (mapa de la dreta) amb les intensitats realment percebudes (mapa de l'esquerra). Es presenta també el càlcul del nombre de municipis afectats per a cada grau d'intensitat, les persones que poden haver-lo percebut i l'àrea afectada.

NW Perpinyà (França)

18/02/1996

42.8 N

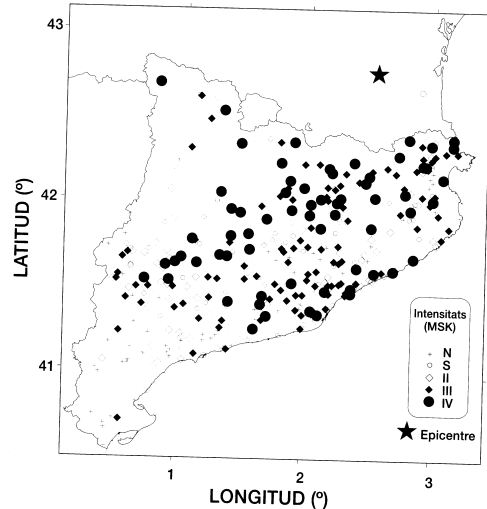
2.5 E

Mag: 5.2

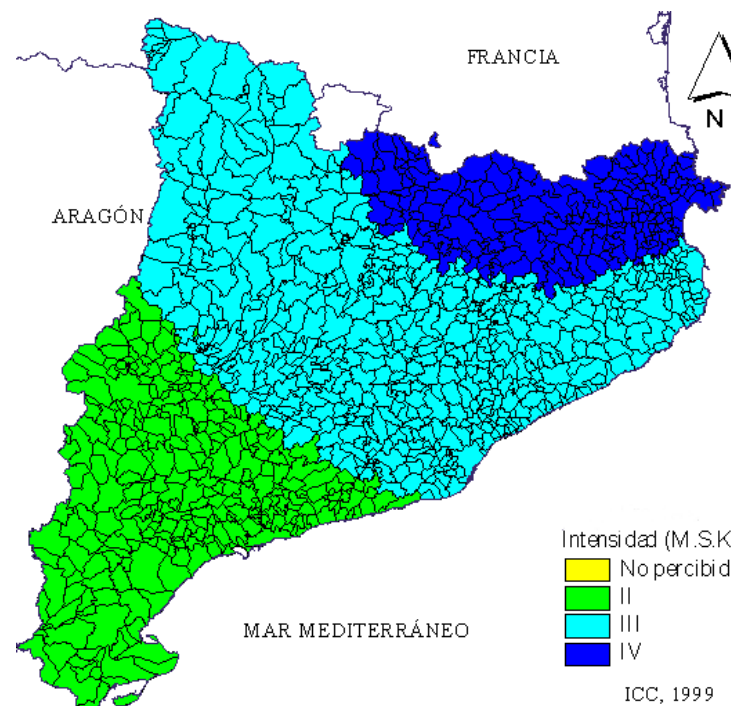
Prof: 8 km

Int. Màx.:IV

Mapa d'Isosistes



Simulació Teòrica



Avaluació de les diferents intensitats probablement percebudes

INTENSITAT(MSK)	Núm MUNICIPALIS	NúmPERSONES	ÀREA AFECTADA(km ²)
No percebut	0	0	0
II	279	896414	9912
III	489	4947908	17511
IV	176	235091	5106
V	0	0	0
VI	0	0	0
VII	0	0	0
VIII	0	0	0
IX	0	0	0

Figura 18. Comparació de les intensitats percebudes del sisme del 18/02/1996 a San Pau de Fenolhet amb la simulació realitzada per a cada municipi(segons González, 2000).

COMENTARI FINAL

Els estudis de risc sísmic que aquí s'han exposat requereixen una estreta col·laboració d'equips científics que cobreixin diferents disciplines (geologia, sismologia, enginyeria, arquitectura, cartografia, ...). És a més, tan o més important comptar amb la participació activa dels tècnics de les administracions, en particular en els àmbits d'edificació, infraestructures i gestió d'emergències, que no només subministren dades o promulguen directrius, sinó que s'integren en els equips de treball. Aquesta aproximació ha estat la pauta seguida en els últims anys per portar a terme els treballs aquí exposats.

AGRAÏMENTS

Aquesta presentació és una síntesi d'una sèrie de treballs, que l'autor ha recollit, i que han estat dirigits i realitzats a l'Institut Cartogràfic de Catalunya pels investigadors del Servei Geològic, Antoni Roca, Xavier Goula, Teresa Susagna, Jorge Fleta, Sara Figueras i Carme Olivera. En gran part tenen el seu origen en les tesis doctorals realitzades per Justina Chávez, ara Professora a la Universitat Autònoma de Santo Domingo (Rep. Dominicana), Javier Cid, ara a la societat EUROGEOTECNICA i Ramón Secanell, a l'actualitat a la societat GEOTER-International i en els treballs realitzats per la col·laboradora Marta González, ara al CRECIT d'Andorra.

Volem expressar també el nostre reconeixement a les institucions que han participat en aquests treballs: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITEC), Universitat de Barcelona (UB), Observatori Fabra (OF), Universidad de Almería, Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil, Direcció General d'Accions Concertades Arquitectura i Habitatge de la Generalitat de Catalunya i Serveis de Protecció Civil de l'Ajuntament de Barcelona.

REFERÈNCIES

Alfaro, A., Goula X., Susagna T., Pujades, L., Canas, J.A., Navarro M. y Sánchez, J. (1998). Estimación del período predominante del suelo a partir de microterremotos. Aplicación a Barcelona. *I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Almería 9-13 Febrero 1998.

Angeletti P., Bellina A., Grandori E., Moetti A. & Petrini V., (1988). Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results. *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, vol 7, 181-186.

Applied Technology Council, (1985), "Earthquake damage evaluation data for California, (ATC-13). Redwood City, California.

Benedetti D. & Petrini V., (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni*, Roma, n° 149, 66-74.

Caicedo C., Canas J.A., Barbat A., Yépez F., Roca A., Goula X. & Mañà F., (1994). Seismic vulnerability assessment of buildings in Barcelona, *Proceedings of the Tenth European Conference on Earthquake Engineering*, Viena, 2, 1023-1028.

Chávez, J. (1998). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: aplicación a Cataluña. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 343 pp.

Chávez, J., Goula, X., Roca, A., Mañà, F., Presmanes, J. & López-Arroyo, A. (1998) "Preliminary seismic risk assessment for Catalonia (Spain). *Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*. Paris (CD-ROM)

- Cid, J. (1996).** Estimació dels paràmetres dinàmics dels sòls, procediment i aplicació a Barcelona. Tesis de Master. Universitat Politècnica de Catalunya, 227 pp.
- Cid, J. (1998).** Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 215 pp.
- Cid, J., Figueras, S., Fleta, J., Goula, X., Susagna, T. y Amieiro, C. (1999).** Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona. *1er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Murcia. 263-271
- Coburn, A. W., Spence, R.J.S. y Pomonis, A. (1992),** "Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse". *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*. 5989 -5994. Madrid.
- Espinoza, F. (1999).** Determinación de características dinámicas de estructuras. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 168 p.
- Fleta, J., Escuer, J., Goula, X., Olivera, C., Combres, Ph., Grellet, & Granier, Th. (1996).** Zonación tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la península Ibérica (Catalunya). *Geogaceta*, Vol. 20, 853-856.
- Fleta, J., Estruch, I. & Goula, X. (1998).** Geotechnical characterization for the regional assessment of seismic risk in Catalonia. *Environmental and Engineering Geophysical Society. Barcelona*.
- González, M., (2000).** Simulación de escenarios de daños. Informe ICC, GS-128/00.
- González, M., Chávez, J., Susagna, T., Goula, X. i Roca, A., (2000).** Simulación de escenarios de daños: aplicación al terremoto del Ripollès (Girona) de 1428. 2ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, pp 203-204.
- Goula, X., Secanell, R., Susagna, T., Fleta, J. & Roca, A. (1997).** Seismic hazard assessment for Catalonia (Spain). *Proc. Second Congress on Regional Geological Cartography and Information systems*. Barcelona. Institut Cartogràfic de Catalunya. 173-177.
- Goula, X., Susagna, T., Figueras, S., Cid, J., Alfaro, A. & Barchiesi, A. (1998).** Comparison of numerical simulation and microtremor measurement for the analysis of site effects in the city of Barcelona. (Spain). *Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*. Paris (CD-ROM)
- ICC (1994- 1999).** Butlletí Sismològic.
- IEC(1990).** Cens d'edificis 1990. Vol.1. Dades municipals. Generalitat de Catalunya.
- Idriss, I. M. & Sun J. I. (1992).** Shake'91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. *User's Guide*. University of California, p.13.
- Lázaro, R., Pinto, V., Rivero, L., Roca, J.L. & Casas, A., (1998).** Gravity anomaly map of Barcelona as a tool for determining structural framework and depth to basement in relation to seismic microzonation of urban area. *European Geophysical Society. XXIII General Assembly*. Nice.
- Losan (1978).** Mapa geotécnico de Barcelona, Badalona, Esplugues, L'Hospitalet, Sant Adrià y Sta. Coloma. Barcelona, 32, 1 mapa.
- Mena, U. (2001).** Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. (en preparació)
- Nakamura, Y., (1989).** A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Rep of RTRF*, 30, 1, February, 25-33.

NCSE-94 (1995). Normativa de Construcción Sismorresistente Española NCSE-94. Real Decreto 2543/94. B.O.E. 33. 8 de febrero de 1995.

Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca, A. (1998). Analysis of seismic hazard in Catalonia (Spain) through different probabilistic approaches. *Eleventh European Conference on Earthquake Engineering*. Paris (CD-ROM)

Secanell, R. (1999). Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: Anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics. Tesis Doctoral Universitat de Barcelona. 335 pp.

Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., Roca, A. (1999). Mapa de zones sísmiques de Catalunya. *1^{er} Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Murcia. 251-259.

SGC (1984- 1994). Butlletí Sismològic.

SGC/ICC (1995- 1999). Butlletí Sismològic

Susagna, T., Cid, J., Lázaro, R., Goula, X., Casas, A., Figueras, S. & Roca, A. (1998). Applying microtremor, gravity anomalies and numerical modelling methods for the evaluation of soil earthquake response in Barcelona, Spain. *Environmental and Engineering Geophysical Society*. Barcelona.

Susagna, T. & Goula, X. (1999). Catàleg de Sismicitat, *Vol I Atlas Sísmic de Catalunya*, (in press).

Yépez F., (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 393pp.