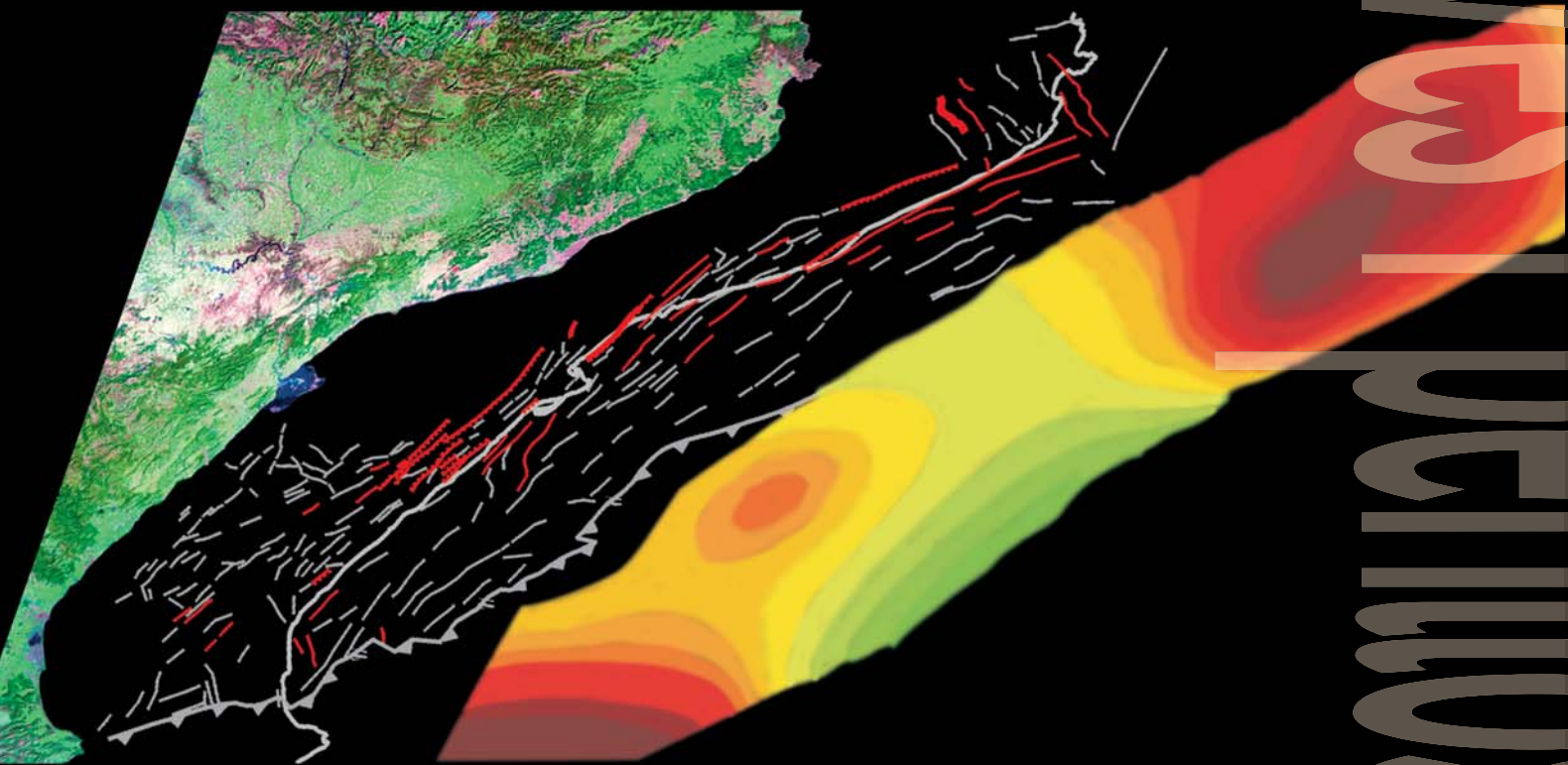


Falles actives i perillositat sísmica al marge nord-occidental del solc de València



Hector Perea Manera

Universitat de Barcelona
RISKNAT - Grup de Riscos Naturals
Departament de Geodinàmica i Geofísica

4 Anàlisi de perillositat sísmica.

4.1. *Introducció*

4.2. *Anàlisi de perillositat sísmica: Introducció*

4.3. *Anàlisi probabilista de perillositat sísmica*

4.4. *Anàlisi probabilista de perillositat sísmica: Model poissonià*

4.5. *Anàlisi probabilista de perillositat sísmica: Model característic*

4.6. *Conclusions*

↑ [Índex](#)

4.1. Introducció

Un dels objectius d'aquesta tesi és el càlcul de la perillositat sísmica al marge nord-occidental del solc de València tenint en compte les falles actives. Es busca veure quines són les diferències que comporta la introducció de les falles a l'anàlisi, però també detectar quins dels paràmetres sísmics que caracteritzen el cicle sísmic de les falles tenen més influència al resultat final.

A continuació es fa una breu introducció sobre els mètodes utilitzats per realitzar l'anàlisi de perillositat sísmica posant èmfasi en el mètode d'anàlisi probabilista i en com s'introdueixen les falles actives a l'anàlisi. Primer s'expliquen els passos seguits per a la realització d'una anàlisi probabilista de perillositat sísmica assumint un comportament poissonià en la recurrència dels terratrèmols. S'expliquen els passos seguits per a la obtenció d'un catàleg de terratrèmols per la zona d'estudi. Es comenta com s'ha realitzat la zonació sísmotectònica i el càlcul dels paràmetres sísmics que caracteritzen cada una de les zones diferenciades. Es mostren les relacions d'atenuació que s'utilitzaran i, finalment, es procedeix a la realització de l'anàlisi probabilista de la perillositat sísmica i s'analitzen els resultats obtinguts. Després es realitza una nova anàlisi, però aquest cop introduint les falles com a fonts sismogèniques assumint que segueixen un comportament de terratrèmol característic. A causa de la variabilitat dels paràmetres sísmics que caracteritzen cada una de les falles, s'han realitzat diversos models de càlcul per veure com aquesta variabilitat dels paràmetres afecta els resultats finals. Això permet establir quins són els paràmetres que tenen una major influència al resultat final i que, per tant, convindria determinar amb una major precisió.

4.2. Anàlisi de la perillositat sísmica

La perillositat sísmica descriu el perill potencial dels fenòmens relacionats amb els terratrèmols, com per exemple el moviment del terreny, la ruptura de les falles o la liquefacció del terreny (Reiter, 1991). La perillositat sísmica és un dels paràmetres necessaris, juntament amb la vulnerabilitat i els costos econòmics, per al càlcul del risc sísmic. El risc sísmic és la probabilitat que un terratrèmol pugui generar conseqüències adverses per la societat, tals com la pèrdua de vides humanes o la destrucció d'edificis (Reiter, 1991).

L'anàlisi de la perillositat sísmica d'una zona es pot realitzar utilitzant dos mètodes d'anàlisi, el determinista i el probabilista. A continuació s'expliquen les principals característiques de cada un.

4.2.1. Anàlisi determinista

L'anàlisi determinista de perillositat sísmica consisteix en calcular els efectes que un terratrèmol conegut (dimensions i font que l'origina) generarà en una localitat concreta (població, infraestructura,...). Aquest tipus d'anàlisi se sol realitzar per obtenir la perillositat sísmica en localitats concretes a causa de terratrèmols concrets, no es busca veure quina influència tenen sobre la perillositat a aquesta zona altres terratrèmols que es poden produir en altres fonts sismogèniques. Un exemple d'aquest tipus d'anàlisi seria: a una localitat X la perillositat sísmica correspon a una acceleració pic del terreny de 0.5 g (50% de l'acceleració de la gravetat) com a resultat de l'ocurrència d'un terratrèmol de magnitud 6.5 a la falla Y, localitzada a una distància de 10 km de X (Reiter, 1991). En conseqüència, per realitzar aquesta anàlisi s'ha de controlar la localització de la font del terratrèmol (falla Y), quina és la mida del terratrèmol que es pot produir (magnitud 6.5) i quina és la distància de la font a la localitat d'interès (10 km).

Una anàlisi determinista comporta el seguiment d'uns passos bàsics (figura 4.1 a; Reiter, 1991):

1. Determinació de la font o fonts del terratrèmol. Aquestes poden ser falles o províncies sismotectòniques (font areal), en el cas en que no s'hagi definit una estructura geològica que pugui ser responsable del terratrèmol.
2. Definir el terratrèmol de control, el màxim terratrèmol que es considera que una font pot produir, i la distància entre la font i la localitat d'interès, que sol correspondre a la mínima distància entre les dues.
3. Càlcul dels efectes del terratrèmol (algun tipus de moviment del terreny: acceleració pic, velocitat pic,...) a la localitat d'estudi que se sol realitzar a partir de relacions d'atenuació del moviment del terreny, amb les quals s'estima quin serà el moviment que produirà un terratrèmol d'una determinada magnitud a diferents distàncies. Aquestes relacions repre-

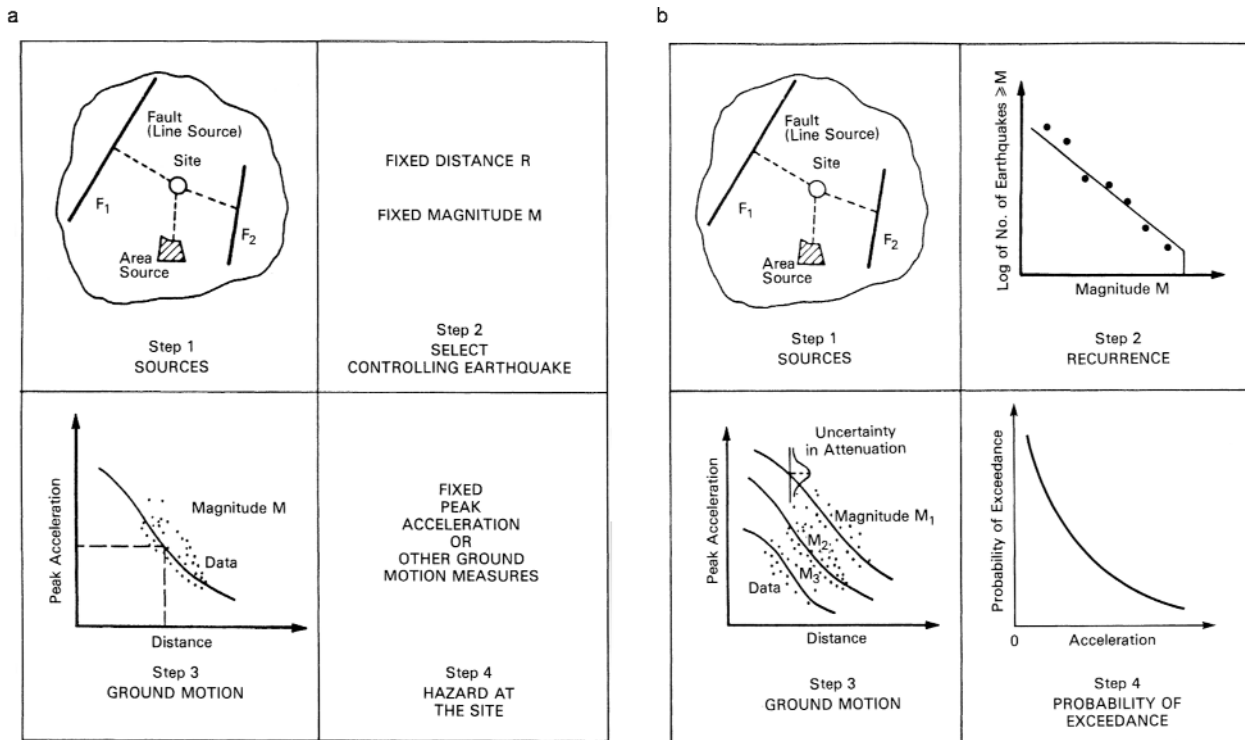


Figura 4.1. Passos bàsics de l'anàlisi determinista (a) i probabilista (b) de perillositat sísmica (Reiter, 1991).

Basic steps of deterministic (a) and probabilistic (b) seismic hazard analysis (Reiter, 1991).

senten la pèrdua d'energia de l'ona sísmica a mida que s'allunya de la font que l'ha originat.

- Definició de la perillositat a la localitat d'estudi, que en molts casos sol ser el resultat directe obtingut del pas 3.

Aquest tipus d'anàlisi té l'avantatge que no necessita dades sobre els processos que depenen del temps, com la taxa d'ocurrència de terratrèmols o la taxa de lliscament de la falla.

4.2.2. Anàlisi probabilista

L'anàlisi probabilista de la perillositat sísmica consisteix en determinar el grau de perillositat en una localitat tenint en compte tots els terratrèmols que puguin afectar-la, a partir de la probabilitat que aquests puguin ser de diferents mides i produïts per diferents fonts (Reiter, 1991). Com a resultat final s'obté la probabilitat d'excedència de diferents nivells de moviment de terreny (acceleració pic, velocitat pic,...) o intensitat en una sèrie de llocs concrets i per un període de temps específic. Un exemple del resultat final seria: X % (90%) de probabilitat d'excedir un determinat grau de moviment del terreny (0.3 g) durant un període de temps concret (50 anys) en una localitat concreta. Matemàticament aquesta probabilitat es pot expressar com:

$$E(z) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \int_{m_0}^{m_u} \int_{r=0}^{r=\infty} f_i(m) f_i(r) P(Z > z | m, r) dr dm \tag{equació 4.1}$$

on $E(z)$ és el nombre esperat d'excedències d'un moviment del terreny z durant un període de temps específic (t), α_i és la taxa mitjana d'ocurrència de terratrèmols entre les magnituds mínima i màxima per cada una de les fonts sismotectòniques (i), $f_i(m)$ és la distribució de densitat de probabilitat d'una magnitud per una zona i , $f_i(r)$ és la distribució de densitat de probabilitat de la distància epicentral entre varies localitats dins d'una mateixa font i i la mida per la qual la perillositat s'està estimant i , finalment, $P(Z > z | m, r)$ és la probabilitat que un terratrèmol de magnitud m i produït a una distància epicentral r excedeixi un moviment del terreny z . La principal assumptió que es fa en l'anàlisi probabilista és que, en una zona, l'ocurrència de terratrèmols segueix el model poissonià (Cornell, 1968), el que significa que els terratrèmols es produeixen de forma independent els uns dels altres, que no tenen memòria, i, per tant, que la seva ocurrència no depen del temps. Per exemple, si avui es produís un terratrèmol de 6.5 en una falla determinada aquest fet no tindria cap influència en la localització del proper terratrèmol.

L'anàlisi probabilista consta de 4 passos bàsics (figura 4.1 b; Reiter, 1991):

1. Definir les fonts on es poden produir els terratrèmols, on cada una ha de tenir el mateix potencial per generar-los en tota la seva àrea. Es realitza una zonació sismotectònica de l'àrea d'estudi on les zones diferenciades poden ser puntuals, lineals, areals i volums.
2. Definir les relacions de recurrència dels terratrèmols per a cada zona sismotectònica. La relació de recurrència dona la probabilitat d'ocurrència de terratrèmols d'una certa mida a qualsevol punt a l'interior d'una zona sismotectònica durant un període de temps específic. Aquesta relació bé donada per l'expressió:

$$\text{Log } N = a - bM \quad \text{equació 4.2}$$

on N és el número acumulat de terratrèmols d'una magnitud concreta o més grans que s'espera que es produeixin durant un període de temps específic, a és el logaritme del nombre de terratrèmols de magnitud 0 o superior que s'espera que es produeixin durant el mateix període de temps i b és el pendent de la corba que caracteritza la proporció que hi ha de terratrèmols petits respecte als grans. Les relacions d'atenuació es poden obtenir també a partir d'altres formulacions, com per exemple les funcions exponencials trunca-des. Per tal d'obtenir unes relacions de recurrència el més fiables possible el catàleg de terratrèmol ha d'estar donat en una mateixa escala de magnitud, hauria d'estar net de premonitoris i rèpliques i s'hauria de fer un estudi sobre la completitud de les diferents magnituds al llarg del temps.

3. Estimació dels efectes dels terratrèmols a partir dels models d'atenuació que relacionen el paràmetre de moviment del terreny (acceleració pic, velocitat pic,...) amb la distància on s'ha produït un terratrèmol d'una determinada magnitud.
4. Determinació del grau de perillositat per una localitat determinada, que correspondrà a la probabilitat que en aquesta localitat s'excedeixi un determinat grau de moviment de terreny en un període de temps concret. Aquests resultats normalment es donen en forma de corbes de probabilitat d'excedència anual del paràmetre de perillositat estimat (acceleració pic, velocitat pic,...) per una localitat concreta, o com a mapes que indiquen els valors del paràmetre de perillositat estimat amb un % de probabilitat que s'excedeixi en un període de temps concret, per exemple mapes d'acceleració pic corresponents a una probabilitat del 10% d'excedència en 50 anys.

A l'anàlisi probabilista de la perillositat sísmica s'hi poden incloure les falles com a fonts sísmogèniques assumint, per exemple, un comportament poissonià en l'ocurrència de terratrèmols o que els grans terratrèmols que aquestes originen mostren una recurrència periòdica perfecte (Reid, 1910) i segueixen el model de terratrèmol característic (Schwartz i Coppersmith, 1984; Youngs i Coppersmith, 1985). En el segon cas, les dues assumpcions fetes impliquen que els grans terratrèmols (a partir d'ara terratrèmols característics) produïts per una falla són idèntics (poden presentar una variació de 0.5 graus de magnitud) i tenen una recurrència constant. Schwartz i Coppersmith (1984) varen veure que l'interval de recurrència observat per als terratrèmols característics era més petit que el que es deduïa per extrapolació de la relació de recurrència obtingudes a partir de les dades sísmiques de terratrèmols de magnituds inferiors (figura 4.2). Així la relació de recurrència deduïda de les dades sísmiques (pendent B) és vàlida fins a una magnitud M' . A partir d'aquí, el pendent de la corba ha de disminuir (B') de valor per enllaçar amb els terratrèmols característics observats geològicament, normalment d'una magnitud 1.5 graus més gran que els terratrèmols de més magnitud detectats sísmicament. Youngs i Coppersmith (1985) van desenvolupar una relació matemàtica a partir de la modificació la relació exponencial truncada per tal de poder introduir el model de terratrèmol característic a l'anàlisi de perillositat sísmica. La informació necessària per realitzar l'anàlisi probabilista tenint en compte el model de terratrèmol característic és: a) la magnitud del terratrèmol característic; b) el seu interval de recurrència; i c) el temps transcorregut des de l'últim que es va produir. Aquestes dades es poden obtenir a partir de l'estudi geològic de les falles actives (veure l'apartat 3.8 del capítol 3).

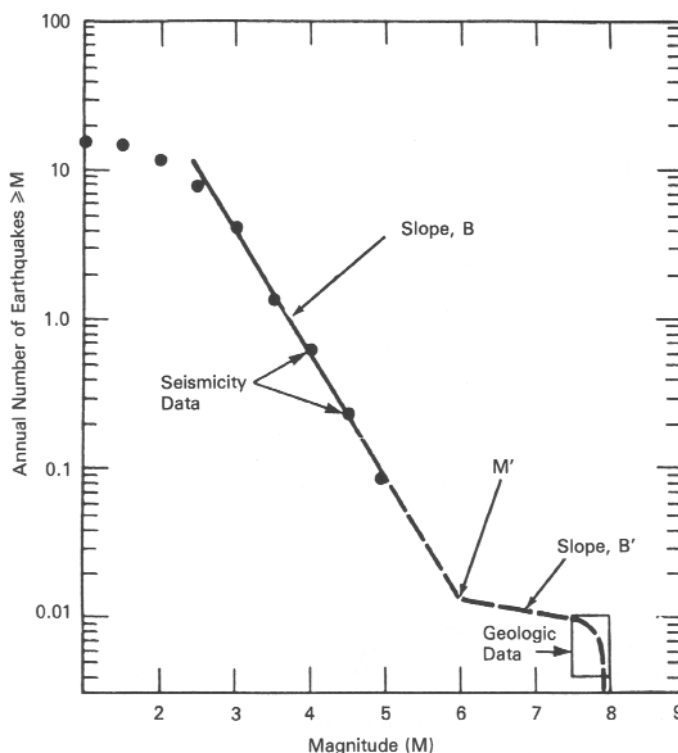


Figura 4.2. Relació de recurrència per falles on s'assumeix el model del terratrèmol característic (Schwartz and Coppersmith, 1984).

Recurrence relationship for faults that fit the characteristic earthquake model (Schwartz and Coppersmith, 1984).

Al marge nord-occidental del solc de València es realitzarà una anàlisi probabilista de la perillositat sísmica. En una primera anàlisi no es tindran en compte les falles com a fonts sismogèniques, que seran introduïdes posteriorment a l'anàlisi per veure quines variacions provoquen i poder identificar quin dels paràmetres determinats a partir de la informació geològica influeix més en el resultat final.

4.3. Anàlisi probabilista de la perillositat sísmica: Passos previs

A continuació es comenten: 1) els passos seguits per a l'obtenció d'un catàleg de terratrèmols per tota la zona d'estudi; 2) les característiques de les fonts areals utilitzades; 3) els paràmetres sísmics obtinguts per cada zona; i 4) els models d'atenuació triats.

4.3.1. El catàleg de terratrèmols

L'obtenció d'un catàleg de terratrèmols el més complet i extens possible és un dels passos més importants en un estudi de perillositat sísmica. A l'hora d'obtenir aquest catàleg cal seguir una sèrie de passos. En primer lloc s'ha de definir la zona on es realitzarà l'estudi. Després s'han de recopilar els catàlegs de terratrèmols procedents de diferents institucions d'àmbit regional, nacional o internacional. Tots aquests catàlegs s'han d'analitzar i comparar entre si per seleccionar-ne el més fiable i establir l'ordre en què la resta es tindran en compte de cara a la fusió de tots ells en un de sol. S'han de fusionar els catàlegs per obtenir-ne un de sol, el més complet possible, tant en el nombre de terratrèmols com en el rang temporal que abasta. Posteriorment s'han d'homogeneïtzar les diferents magnituds i intensitats en un sol tipus de magnitud per a tot el catàleg i extreure'n els premonitoris, les rèpliques, els sismes falsos i els artificials. Finalment, s'ha d'analitzar el catàleg final per veure quina és la seva completitud de cara a l'anàlisi de la perillositat sísmica

4.3.1.1. Recopilació de catàlegs

L'estudi de perillositat sísmica s'ha realitzat al marge nord-occidental del solc de València. L'àrea geogràfica per a la que es realitzarà l'estudi de perillositat sísmica està compresa entre les latituds 39°N i 43°N i entre les longituds 1°W i 4°E, per evitar possibles efectes de vora l'àrea que hauria de cobrir el catàleg final aniria de 38°N a 44°N de latitud i de 2°W a 5°E de longitud. Per obtenir el catàleg de terratrèmols el més complet possible per aquesta zona s'han consultat les bases de dades de diferents institucions:

1. Institut Cartogràfic de Catalunya (d'ara en endavant ICC, direcció electrònica: <http://www.icc.es/sismes/home.html>). Hi ha disponibles dos catàlegs de terratrèmols, un on es dona informació macrosísmica (d'ara en endavant ICC-M) i un altre on es dona informació instrumental (d'ara en endavant ICC-I).
2. Instituto Geográfico Nacional (d'ara en endavant IGN, direcció electrònica: <http://www.mfom.es/ign>).
3. National Geophysical Data Center - Preliminary Determination of Epicenters (d'ara en

endavant PDE, direcció electrònica: <http://neic.usgs.gov/neis/epic>)

4. International Seismological Centre (d'ara en endavant ISC, direcció electrònica: <http://www.isc.ac.uk>)

Els catàlegs recopilats provenen de diferents agències amb diferents interessos i, per tant, el temps cobert per cada catàleg també és diferent (figura 4.3 i taula 4.1). El fet de treballar amb diferents catàlegs donarà com a resultat un catàleg final que cobrirà tots els períodes en que es divideix el coneixement de la sismicitat a la Terra a nivell global (Johnston i Halchuk, 1993): 1) el pre-instrumental (informació anterior al segle XX); 2) els principis de l'instrumental (entre 1900 i 1963); i 3) el modern (des del 1964 i fins l'actualitat). Entre els catàlegs recopilats n'hi ha dos, els catàlegs de l'ICC-M i de l'IGN, que abasten totes les eres, tot i que el catàleg de l'ICC-M només dona informació sobre la intensitat dels terratrèmols i arriba fins l'any 1996. La resta de catàlegs, ICC-I, PDE i ISC només cobreixen l'era moderna, tot i que no tots tres des del seu inici (taula 4.1).

A continuació s'analitzarà cada un dels catàlegs recopilats amb la finalitat de conèixer l'àrea que cobreixen i tenir una idea bàsica sobre la seva completitud. Per mirar quina és l'àrea que cobreix cada catàleg s'han fet mapes de la zona d'estudi on s'han situat tots els terratrèmols de cada un d'ells. L'anàlisi de la completitud de cada catàleg donarà una idea de a partir de quin moment i per quines magnituds el catàleg es pot considerar complet, és a dir, que s'han enregistrat tots els terratrèmols d'una determinada magnitud o intensitat. Aquesta anàlisi s'ha realitzat, tot i que hi ha d'altres mètodes (Steepe, 1971; Reasenber, 1985), a partir de:

1. L'histograma d'ocurrència anual de terratrèmols: mostra el nombre de terratrèmols enregistrats al catàleg per cada any i indicarà els moments on hi ha hagut un increment en el nombre de terratrèmols enregistrats o on l'enregistrament ha estat aproximadament constant. La variació en el nombre de terratrèmols enregistrats, assumint que el seu nombre és aproximadament constant al llarg del temps per una mateixa zona, pot estar lligada a un densitat més gran o de població, en el cas dels terratrèmols històrics, o d'estacions sísmiques, en el cas dels terratrèmols instrumentals.

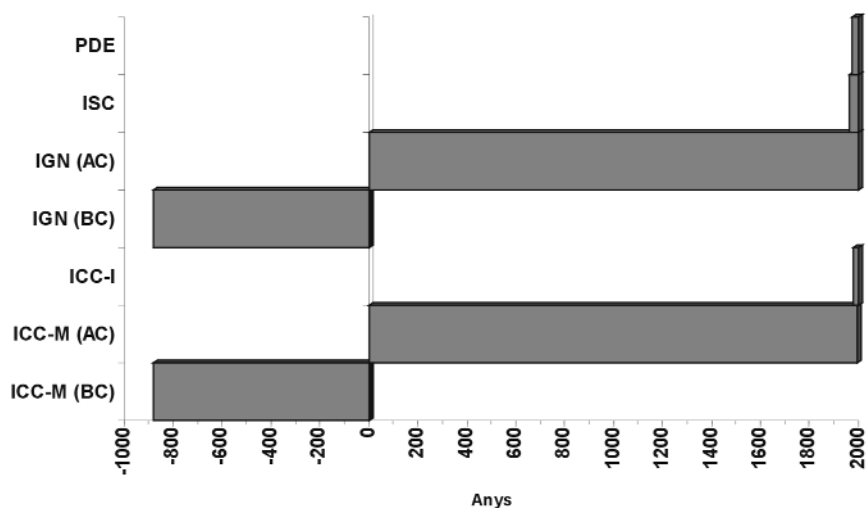


Figura 4.3. Temps que abasten els diferents catàlegs de terratrèmols recopilats.

Time covered by the different earthquake catalogs compiled.

Catàleg	Nº de terratrèmols		Interval de temps		Magnitud		
	Total	Amb magnitud	Inici	Final	Mag o Int max	Mag o Int min	
ICC-M (Intensitat)	918	0	-880	1996	IX-X	II	
ICC-I (ML)	3718	3165	1977	2001	5.2	0.1	
IGN	IMSK mbLg	4636	721	-880	2001	IX	I-II
			3355	1919	2001	5.3	0.4
			1	1964	2001	5.0	5.0
ISC	MS	32	5	1964	2001	4.7	3.3
			13	1964	2001	5.3	2.9
PDE	MI mb MD Mn UK		1586	1973	2003	5.1	0.3
			27	1973	2003	5.6	3.4
		3917	184	1973	2003	3.8	1.0
			936	1973	2003	5.2	0.7
			37	1973	2003	3.5	2.4

Taula 4.1. Principals característiques dels diferents catàlegs de terratrèmols recopilats.

Main characteristics of the different earthquake catalogs used.

2. El gràfic del nombre acumulat de terratrèmols al llarg del temps: corba que mostra el nombre de terratrèmols acumulats que hi ha hagut en una zona des del principi del catàleg fins a un any determinat. Els canvis de pendent de la corba aniran lligats a moments on s'ha produït un increment en el nombre de terratrèmols enregistrats. Les causes d'aquest increment seran les mateixes que les comentades per l'histograma d'ocurrència anual de terratrèmols.
3. El diagrama de dispersió de la magnitud dels terratrèmols per any: mostra les diferents intensitats o magnituds de terratrèmols que s'han sentit en un any. A partir del moment en que s'observi que anualment s'enregistren terratrèmols d'una mateixa intensitat o magnitud es podrà considerar que el catàleg és complet per a aquesta intensitat o magnitud i superiors.

Catàleg ICC-M

El catàleg de l'ICC-M és una recopilació de terratrèmols que han estat sentits a Catalunya i les zones més properes des de l'any 880 AC i fins al 1996. Per a l'obtenció d'aquest catàleg l'ICC va revisar tots els catàlegs i la informació existent utilitzant el mètode establert al projecte BEECD (*Basic European Earthquake Catalogue and Database for the evaluation of long term seismicity and seismic hazard*) de la Unió Europea (Susagna et al., 2000). El resultat va ser la publicació de l'**Atlas Sísmic de Catalunya-Volum 1** (Susagna i Goula, 1999).

L'ICC-M inclou un total de 918 terratrèmols (taula 4.1), dels quals n'hi ha 258 sense intensitat assignada i 58 que són considerats falsos. Les intensitats al catàleg estan compreses entre II i IX-X i estan donades amb l'escala MSK. La distribució geogràfica dels terratrèmols a la zona que cobreix el catàleg és irregular i, com ja s'ha comentat, tant sols cobreix la zona de Catalunya i àrees properes (figura 4.4). Geogràficament hi ha tres zones que presenten una densitat més elevada de terratrèmols, el Pirineu central i oriental i el nord de les Cadenes Costaneres Catalanes. Hi ha una gran zona que correspon al sud de les Cadenes Costaneres Catalanes i el nord de les conques del Maestrat on la densitat és baixa. Finalment, es pot distingir una gran zona central,

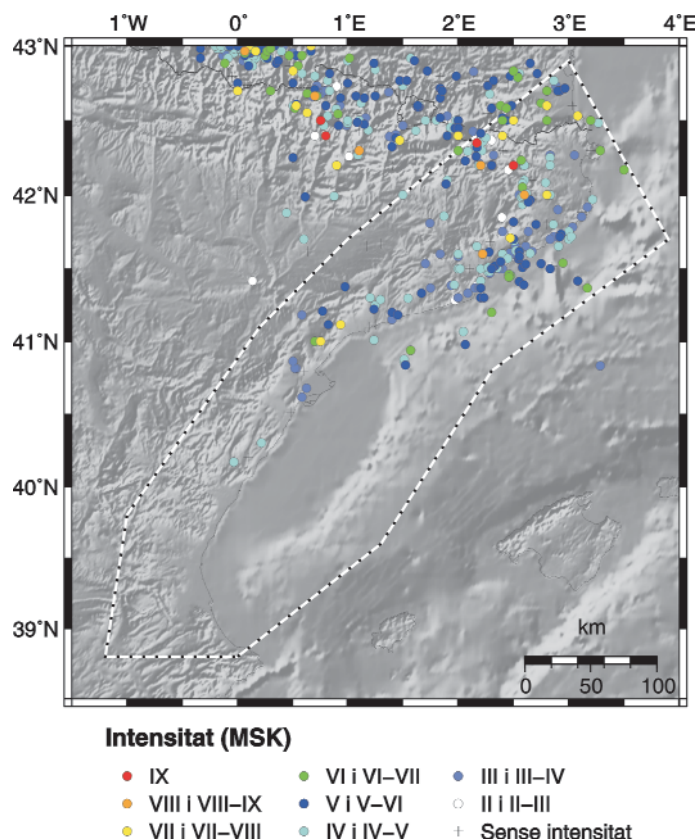


Figura 4.4. Distribució geogràfica dels terratrèmols del catàleg ICC-M. Es pot observar que el catàleg tant sols cobreix la zona corresponent a Catalunya i les seves zones veïnes. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

Geographical distribution of earthquakes of the ICC-M catalog. Notice that the catalog only covers the Catalunya zone and its surrounding areas. The white line with black dots bounds the study zone.

corresponent a la conca de l'Ebre, que mostra una activitat molt baixa, pràcticament no hi ha terratrèmols.

Pel que fa a la completitud del catàleg, l'histograma de la distribució de terratrèmols per any (figura 4.5 a) mostra un increment en el nombre de terratrèmols reportats des del segle XIX. A més, a l'histograma es poden veure quatre pics anteriors a aquest increment que corresponen als anys 1373 (terratrèmol de la Ribagorça), 1427 (terratrèmols de la crisi sísmica catalana), 1750 (terratrèmol de Juncals, França) i 1755 (terratrèmol de Prades, França). El gràfic del nombre de terratrèmols acumulats per any (figura 4.5 b) mostra el mateix fet que l'histograma abans comentat. Es pot observar un increment molt marcat en el nombre acumulat de terratrèmols a finals del segle XIX i, també, una sèrie de graons que corresponen als moments on es localitzen els quatre grans terratrèmols comentats anteriorment. El diagrama de la dispersió de les magnituds per anys (figura 4.5 c) mostra que el catàleg es podria considerar complet per intensitats per sobre de VII des de la meitat del segle XVIII, per VI des del XIX i per magnituds de V i IV des de començaments del XX. Per intensitats més baixes es podria considerar incomplet.

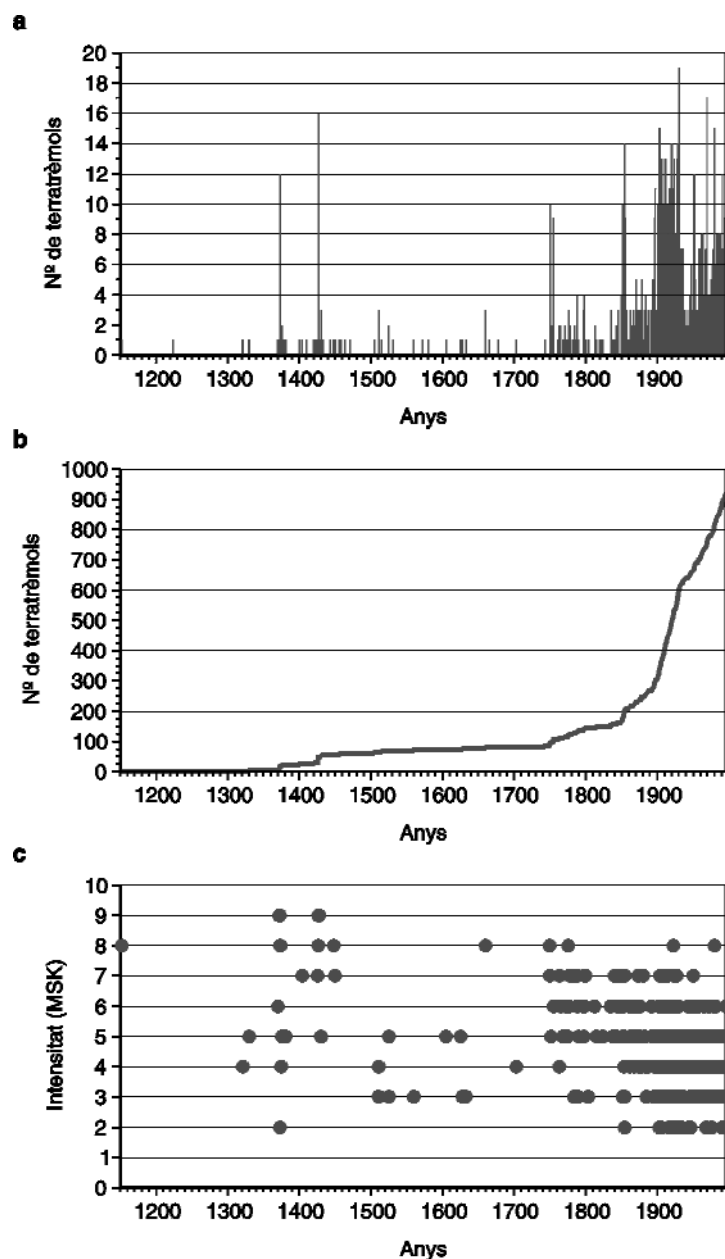


Figura 4.5. Anàlisi del catàleg de terratrèmols del ICC-M. a) Histograma de la distribució anual de terratrèmols. b) Nombre acumulat de terratrèmols per any. c) Diagrama de dispersió de les magnituds per any.

Analysis of the ICC-M earthquake catalog. a) Histogram of the earthquake distribution per year. b) Cumulative number of earthquakes per year. c) Dispersion diagram of magnitudes per year.

Catàleg ICC-I

L'ICC localitza els terratrèmols, bàsicament, a partir de la seva pròpia xarxa sísmica, tot i que també utilitza informació provinent d'altres institucions tal i com informen als seus bulletins anuals (ICC, 2002). La xarxa sísmica està composta per un total de 14 estacions distribuïdes arreu de Catalunya, però presentant una major densitat a la zona dels Pirineus (figura 4.6). Aquesta xarxa s'ha anat millorant i densificant, fent que al llarg dels últims 25 anys es puguin distingir dos períodes on s'ha produït un increment en el nombre d'estacions a la xarxa sísmica (figura 4.7). El primer període correspondria al principi de la dècada dels noranta i el segon al final de la mateixa dècada i principis del segle XXI. Aquesta millora de la xarxa ha fet possible l'enregistrament de molts més terratrèmols i de magnituds més petites.

El catàleg ICC-I és el resultat de la recopilació de diferents catàlegs de terratrèmols instrumentals proporcionats per l'ICC a través de la seva pàgina web. Per una banda, s'ha obtingut un catàleg de terratrèmols ocorreguts a la zona coberta per les estacions sísmiques de l'ICC entre els anys 1977 i 1997. I per una altra banda, s'ha recopilat informació que va de l'any 1996 al 2001 provinent dels butlletins sismològics que anualment publica l'ICC.

Al catàleg ICC-I hi ha un total de 3718 terratrèmols, dels quals 553 no tenen magnitud assignada (taula 4.1). La magnitud utilitzada al catàleg és M_l amb un rang entre 0.1 i 5.2. Analitzant el nombre de terratrèmols i la distribució de les magnituds amb el temps es pot estimar els anys per als quals el catàleg es podria considerar complet. L'histograma de la distribució de terratrèmols

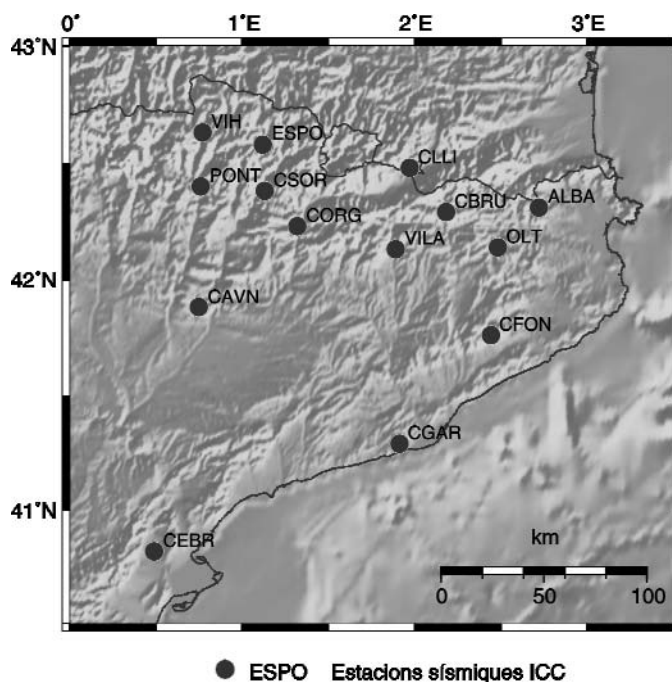


Figure 4.6. Distribució geogràfica de les estacions sísmiques de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).

Geographical distribution of the seismic stations of the Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).

per any (figura 4.8 a) mostra que hi ha dos moments on es produeix un increment important en el nombre de terratrèmols detectats, un a començaments dels anys noranta i l'altra a partir de l'any 1995. A la gràfica que mostra el nombre de terratrèmols acumulats per any (figura 4.8 b) es pot veure de forma clara que al voltant dels anys 1990, 1994 i 2000 es produeix un trencament del pendent de la corba. Aquests increments del pendent de la corba marquen increments en el nombre de terratrèmols enregistrats i corresponen als moments en què la xarxa sísmica ha estat millorada. Al diagrama que mostra la dispersió de les magnituds per anys (figura 4.8 c) s'observa que el catàleg podria considerar-se complet per magnituds superiors a 2.5 des de l'inici del catàleg i per magnituds per sobre de 2.0 des de l'inici de la dècada dels noranta. Per magnituds per sota de 2.0 la detecció dels terratrèmols depen de la distribució de les estacions de la xarxa sísmica. Per exemple, el catàleg seria més complet per magnituds baixes a la zona dels Pirineus que a la conca de l'Ebre a causa de la diferent densitat d'estacions.

Al mapa que mostra la distribució espacial dels terratrèmols enregistrats al catàleg ICC-I (figura 4.9) es pot veure que l'àrea coberta es restringeix a la zona de Catalunya i àrees properes, per tant aquest catàleg no cobreix la totalitat del marge nord-occidental del solc de València. Els terratrèmols d'aquest catàleg mostren una distribució geogràfica similar a la que mostren els del catàleg ICC-M (figures 4.4). Hi ha tres zones que mostren una alta densitat de terratrèmols, els Pirineus central i oriental i el nord de les Cadenes Costaneres Catalanes. A la zona sud de les Cadenes Costaneres Catalanes i al nord de les Conques del Maestrat la densitat és entre baixa i moderada. Finalment, a la zona de la conca de l'Ebre la densitat de terratrèmols és molt baixa.

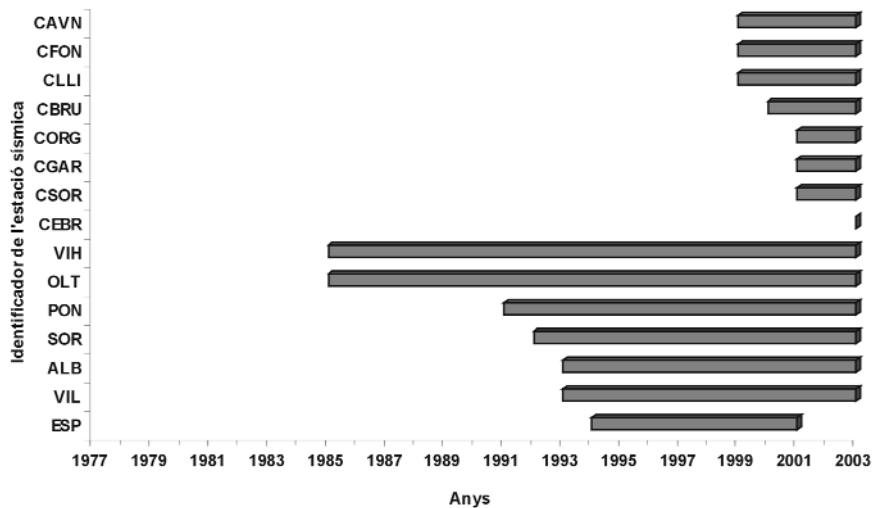


Figura 4.7. Diagrama de barres que mostra els anys que fa que les estacions de la xarxa sísmica de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) estan en funcionament.

Bars diagram showing the year since each station of the Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) seismic network is recording.

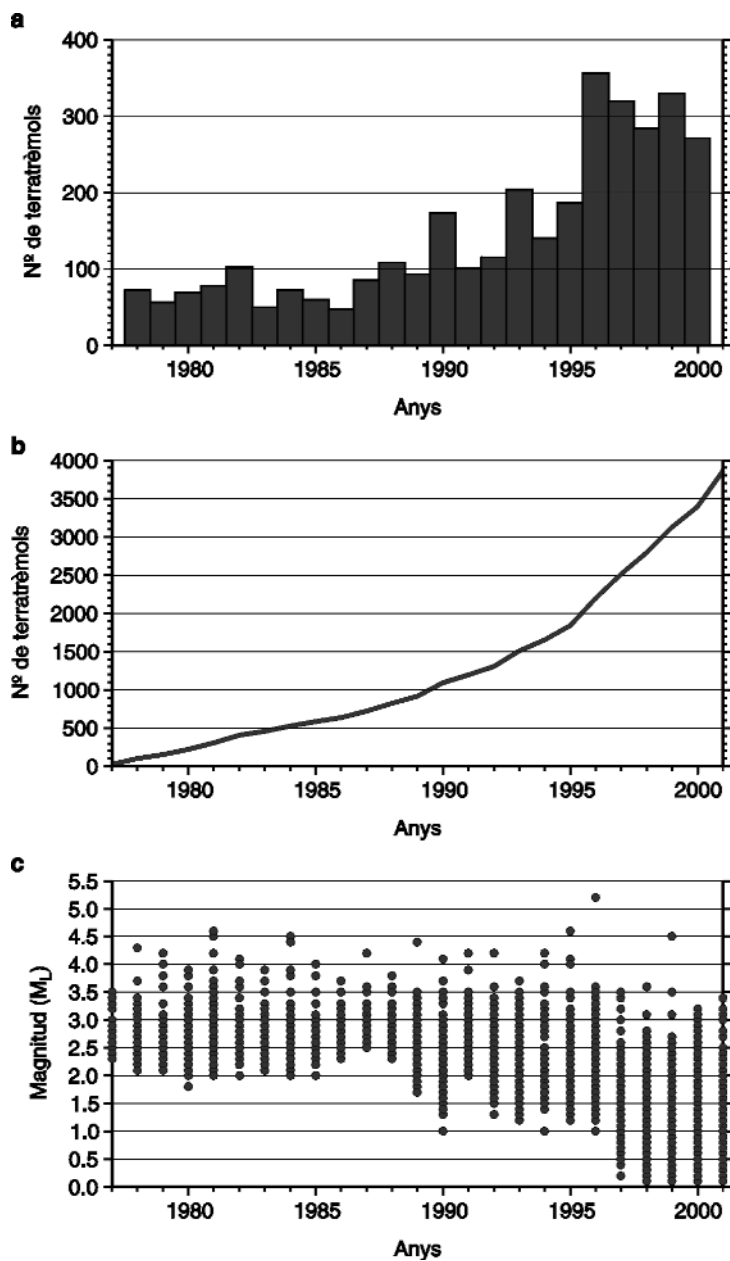


Figura 4.8. Anàlisi del catàleg de terratrèmols ICC-I. a) Histograma de la distribució anual de terratrèmols. b) Nombre acumulat de terratrèmols per any. c) Diagrama de dispersió de les magnituds per any.

Analysis of the ICC-I earthquake catalog. a) Histogram of the earthquake distribution per year. b) Cumulative number of earthquakes per year. c) Dispersion diagram of magnitudes per year.

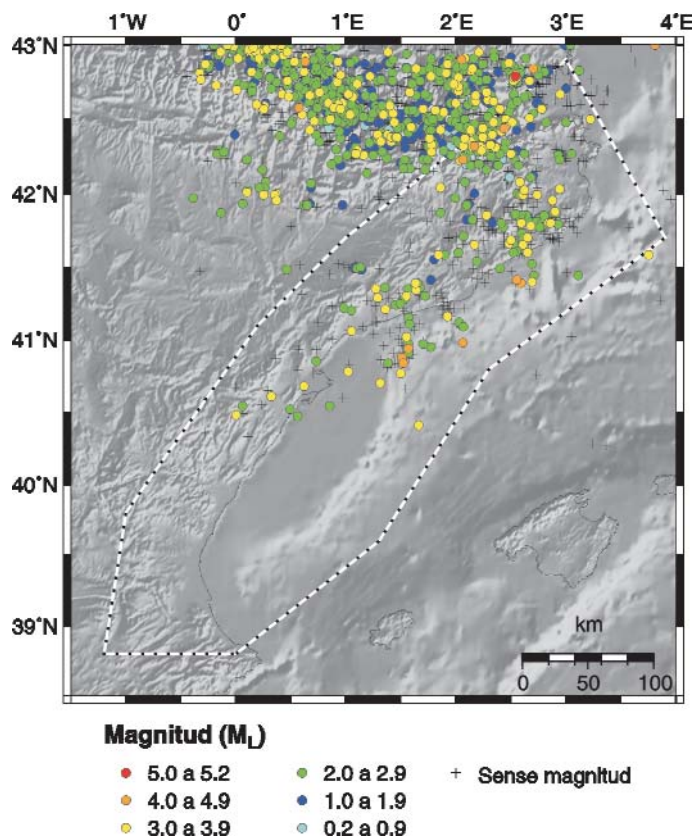


Figura 4.9. Distribució geogràfica dels terratrèmols del catàleg ICC-I. Es pot observar que al catàleg tant sols cobreix la zona corresponent a Catalunya i les seves zones veïnes. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

Geographical distribution of earthquakes of the ICC-I catalog. Notice that the catalog only covers the Catalunya zone and its surrounding areas. The white line with black dots bounds the study zone.

Catàleg IGN

El catàleg de l'IGN és una recopilació dels terratrèmols que han estat sentits o enregistrats entre els paral·lels 34°N i 44°N i els meridians 18°W i 6°E i les illes Canàries i, temporalment, va des de l'any 880 AC i fins al 2001. El catàleg ha estat proporcionat directament per l'IGN i hi ha informació sobre les seves característiques tant a la pàgina web del propi IGN, a Mezcua i Martínez Solares (1983) i a Martínez Solares i Mezcua (2002).

L'IGN localitza els terratrèmols a partir de les dades recollides per les estacions de la seva pròpia xarxa sísmica i de la informació provinent d'altres institucions i xarxes sísmiques. La xarxa sísmica de l'IGN consta de 25 estacions distribuïdes per Espanya i el nord d'Àfrica, presentant una densitat d'estacions força més elevada a la zona de les Bètiques (figura 4.10). El període de temps en què les estacions de la xarxa sísmica de l'IGN han estat enregistrant és variable. Durant la dècada dels vuitanta es va produir un notable increment del nombre de les estacions sísmiques. Des d'aleshores aquest increment ha estat menor i principalment localitzat a mitjans de la dècada del noranta.

A la zona d'estudi, el catàleg de l'IGN abasta temporalment des de l'any 880 AC i fins al 2001 (taula 4.1). De totes formes s'hi ha inclòs el terratrèmol del dia 21 de setembre del 2003 (dins del

mar als sud de València, m_{BLg} 4.6) pel seu interès de cara a l'anàlisi de la perillositat sísmica. El nombre de terratrèmols inclosos al catàleg de l'IGN per al marge nord-occidental del solc de València és de 4636, dels quals 1271 no tenen magnitud o intensitat assignada. S'ha de remarcar que aquest catàleg també inclou els terratrèmols històrics per als quals només es disposa de la seva intensitat. Aquest és un catàleg que abasta un gran període de temps, però no és fins al segle XIX on s'observa un notable increment dels terratrèmols detectats i és, sobretot, durant el segle XX amb l'inici de l'era instrumental on aquest increment és fa molt més evident (figura 4.11a). La distribució geogràfica dels terratrèmols (figura 4.11b) posa de manifest que el catàleg de l'IGN cobreix l'àrea d'estudi en la seva totalitat, a diferència dels catàlegs de l'ICC. Tot i que en la zona on els catàlegs de l'IGN i ICC coincideixen la distribució de terratrèmols és idèntica, al catàleg de l'IGN s'observa una altra zona amb una important densitat de terratrèmols, el front septentrional de les Bètiques.

Al catàleg hi ha 499 terratrèmols corresponents al període pre-instrumental que van d'intensitat (MSK) X fins a II. Dins d'aquests terratrèmols n'hi ha 298 als quals no se'ls ha donat intensitat, 5 que han estat considerats premonitoris i 99 rèpliques. Tots aquests terratrèmols abasten un període de temps que va des de l'inici del catàleg i fins l'any 1899. La distribució geogràfica dels terratrèmols d'aquest període (figura 4.12) està en concordança amb el que mostra la totalitat del catàleg (figura 4.11b). Com es pot veure a l'histograma de la distribució de terratrèmols per any i al gràfic de terratrèmols acumulats per any (figura 4.13 a i b) el nombre de terratrèmols reportats s'incrementa de forma notable a partir de la segona meitat del segle XVIII i sobretot durant el XIX. De totes formes a la figura 4.13a es poden diferenciar clarament dos pics. El primer correspon a l'any 1373 i el segon se situa a l'any 1427 i corresponen als terratrèmols de la Ribagorça i als de la crisi sísmica catalana, ambdós també identificats al ICC-M. El diagrama de dispersió de les intensitats per anys (figura 4.13c) mostra que el catàleg podria ser considerat complet per intensitats per sobre de VIII des del seu inici, per intensitat VII des de mitjans del segle XVIII i per intensitat VI des del segle XIX. Per intensitats més petites es consideraria incomplet.

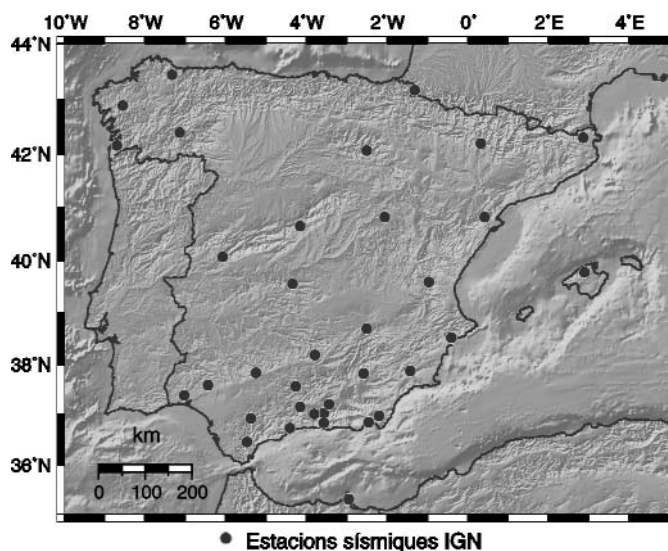


Figura 4.10. Distribució geogràfica de les estacions sísmiques de l'Institut Geogràfic Nacional (IGN).

Geographical distribution of the seismic stations of the Instituto Geográfico Nacional (IGN).

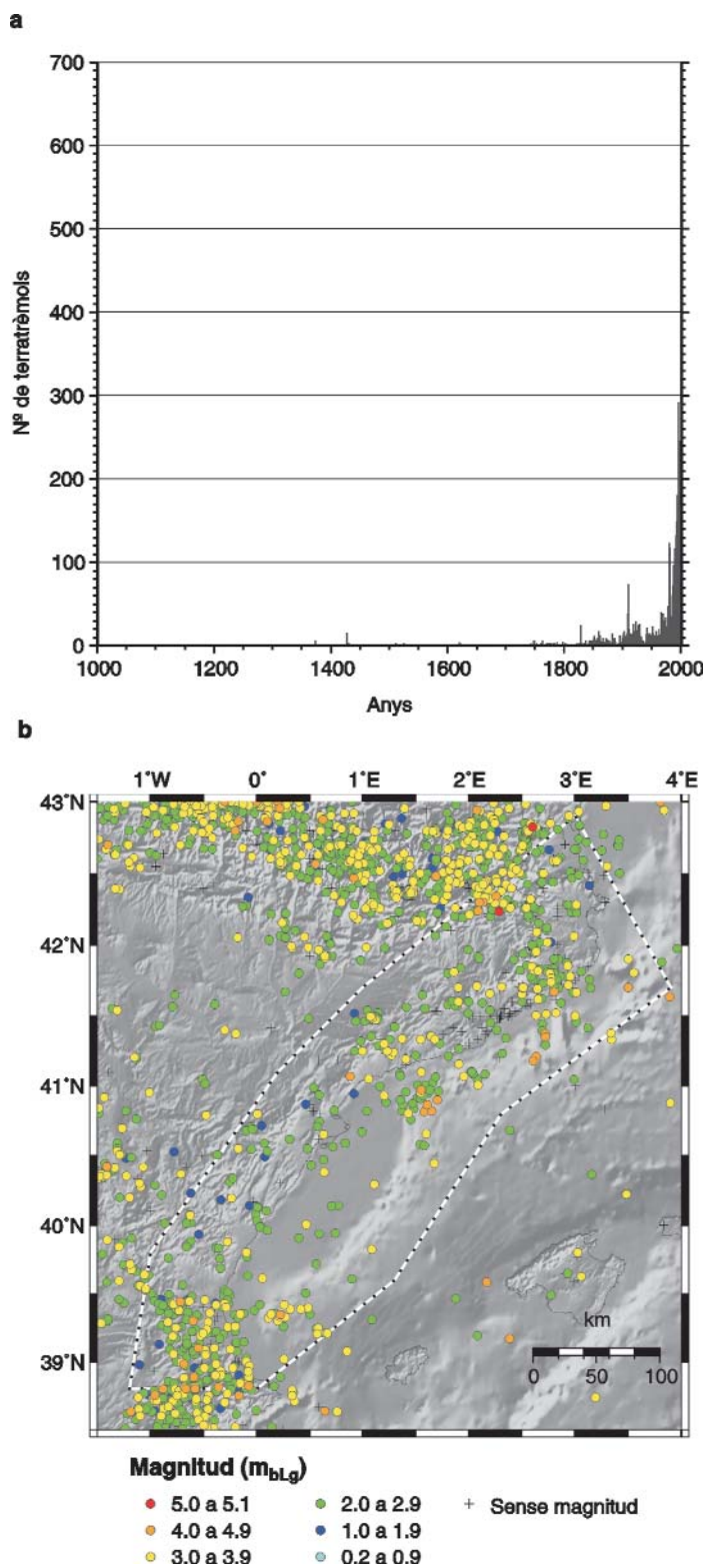


Figura 4.11. Catàleg de terratrèmols de l'Institut Geogràfic Nacional (IGN). a) Histograma de la distribució anual de terratrèmols. b) Distribució geogràfica dels terratrèmols. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

Instituto Geográfico Nacional (IGN) earthquakes catalog. a) Histogram of the earthquake distribution per year. b) Geographical distribution of earthquakes. The white line with black dots bounds the study zone.

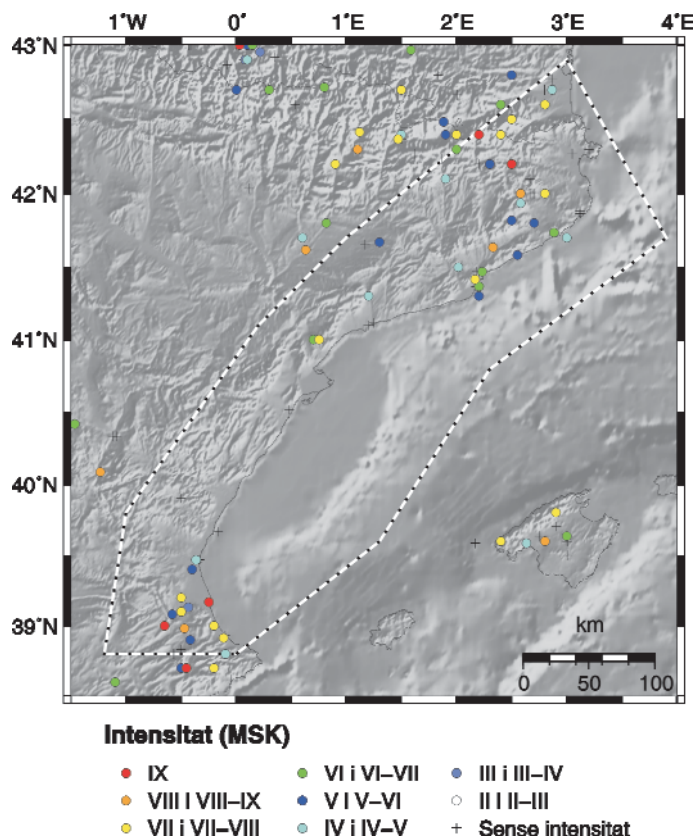


Figura 4.12. Distribució geogràfica dels terratrèmols del període pre-instrumental enregistrats al catàleg de l'IGN. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

Geographical distribution of earthquakes corresponding to the pre-instrumental era registered in the IGN catalog. The white line with black dots bounds the study zone.

Al període instrumental no s'ha diferenciat entre principis de l'era instrumental i era moderna (Johnston i Halchuk, 1993) i, per tant, el catàleg abasta des de l'any 1900 i fins al 2001, amb la inclusió del terratrèmol del dia 21 de setembre del 2003 com s'ha comentat anteriorment. El nombre total de terratrèmols enregistrats al catàleg és de 4138, dels quals 772 no tenen magnitud assignada. Hi ha un total de 1340 terratrèmols dels quals també es té informació d'intensitat (1257 amb escala MSK i 82 amb escala EMS'98). De la totalitat de terratrèmols, 619 han estat identificats com a rèpliques i 88 com a premonitoris. L'histograma de la distribució de terratrèmols per any (figura 4.14 a) mostra que s'ha produït un increment regular en l'enregistrament de terratrèmols des del començament dels anys vuitanta i fins a l'actualitat, tot i que s'observa un comportament una mica irregular a mitjans dels anys noranta. La gràfica del nombre de terratrèmols acumulats per any (figura 4.14b) mostra un important increment del nombre de terratrèmols enregistrats a partir dels anys vuitanta i un increment regular fins a l'actualitat. L'increment del nombre de terratrèmols enregistrats a partir dels anys vuitanta està relacionat amb l'increment del nombre d'estacions sísmiques que es va produir durant aquella dècada. El diagrama de la dispersió de les magnituds respecte als anys (figura 4.14c) mostra que el catàleg podria ser considerat complet per a magnituds per sobre de 3.0 des de mitjans dels anys setanta, per magnitud 2.5 des de mitjans dels vuitanta i per magnitud 2.0 des de l'inici dels noranta. Com ja s'ha comentat abans pel catàleg de l'ICC-I, la completitud per magnituds per sota de 2.0 dependrà de la densitat d'estacions sísmiques a cada zona.

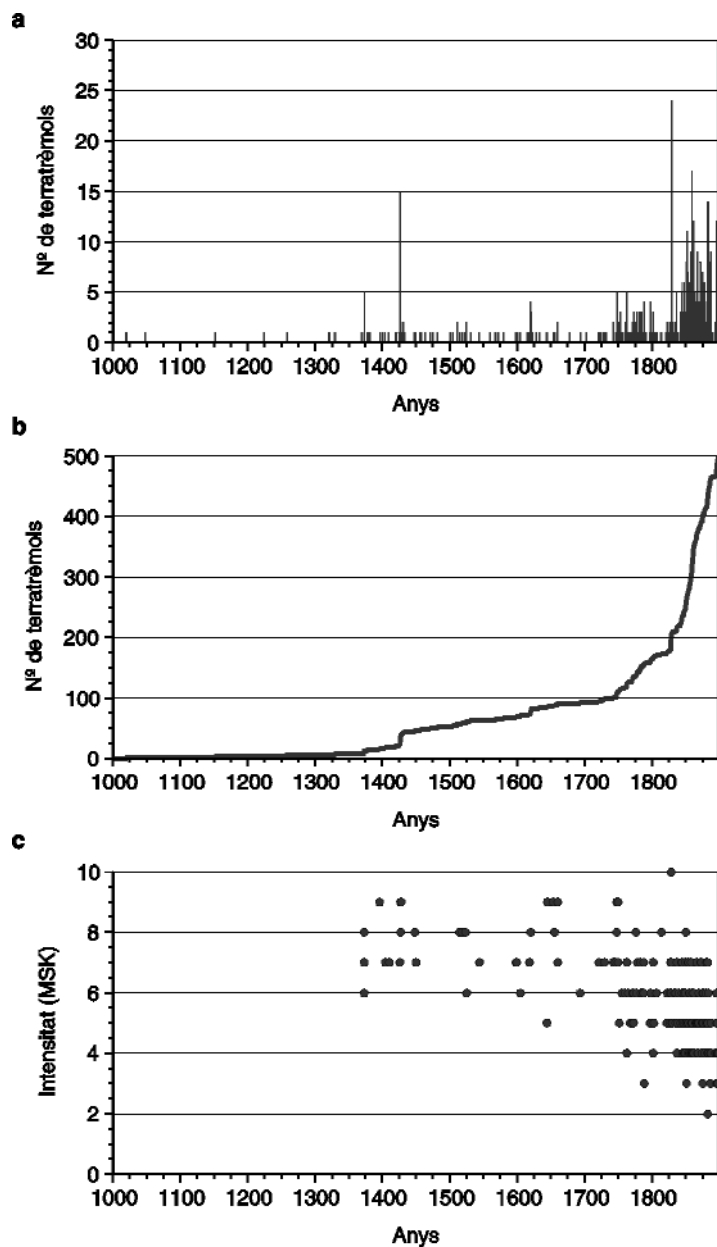


Figura 4.13. Anàlisi del catàleg de l'IGN. a) Histograma de la distribució anual de terratrèmols. b) Nombre acumulat de terratrèmols per any. c) Diagrama de dispersió de les magnituds per any.

Analysis of the IGN catalog. a) Histogram of the earthquake distribution per year. b) Cumulative earthquakes per year. c) Dispersion diagram of magnitudes per year.

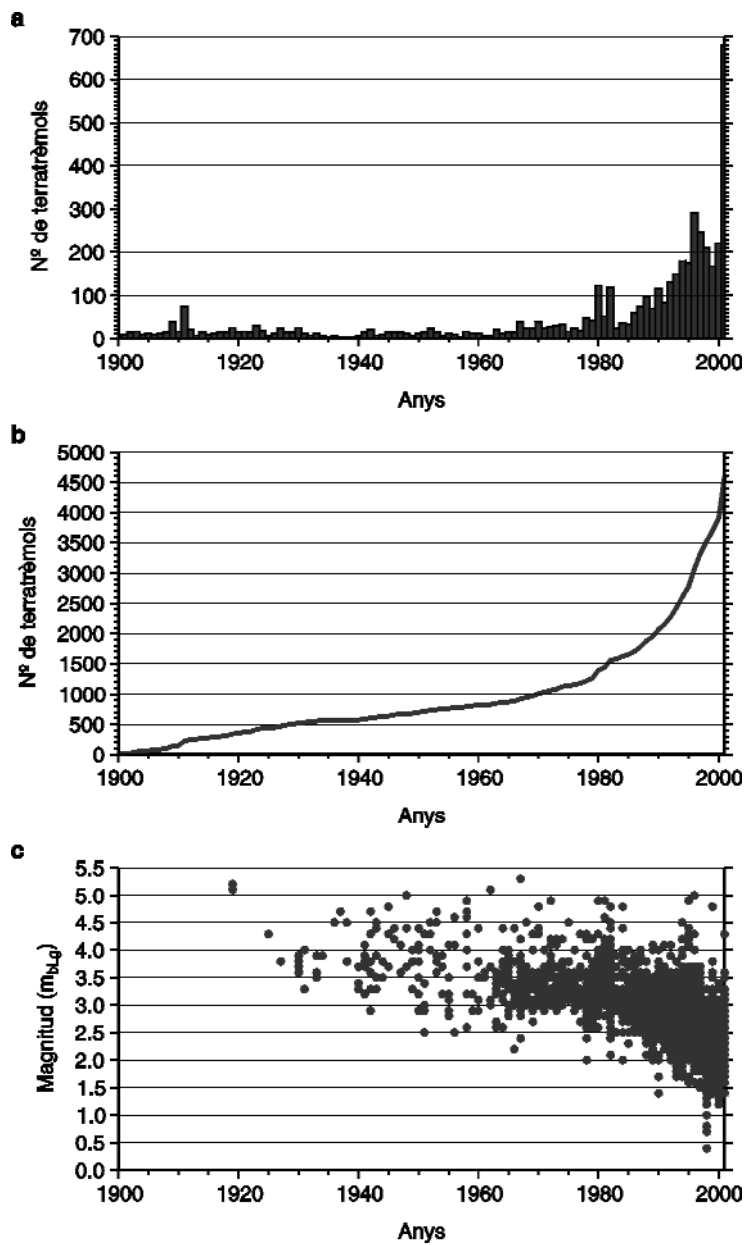


Figura 4.14. Anàlisi de la part del catàleg de l'IGN corresponent al període instrumental. a) Histograma de la distribució anual de terratrèmols. b) Nombre acumulat de terratrèmols per any. c) Diagrama de dispersió de les magnituds per any.

Analysis of the IGN catalog corresponding to the instrumental era. a) Histogram of the earthquake distribution per year. b) Cumulative number of earthquakes per year. c) Dispersion diagram of magnitudes per year.

Catàleg PDE

El catàleg PDE és un catàleg de sismicitat mundial on mensualment s'afegeixen els terratrèmols que s'han produït a qualsevol punt de la Terra recopilats de les diferents agències nacionals o regionals. L'USGS-NEIC del Estats Units és l'organisme encarregat d'aquest catàleg. Aquest catàleg abasta un període de temps que va des de l'any 1973 i fins a l'actualitat. Per la zona del marge nord-occidental del solc de València hi ha un total de 3917 terratrèmols amb un rang de magnituds que va des de 0.3 fins a 5.6, tot i que no tots donats en la mateixa escala de magnitud (taula 4.1). D'entre les diferents escales de magnitud utilitzades hi predomina la M_L (magnitud

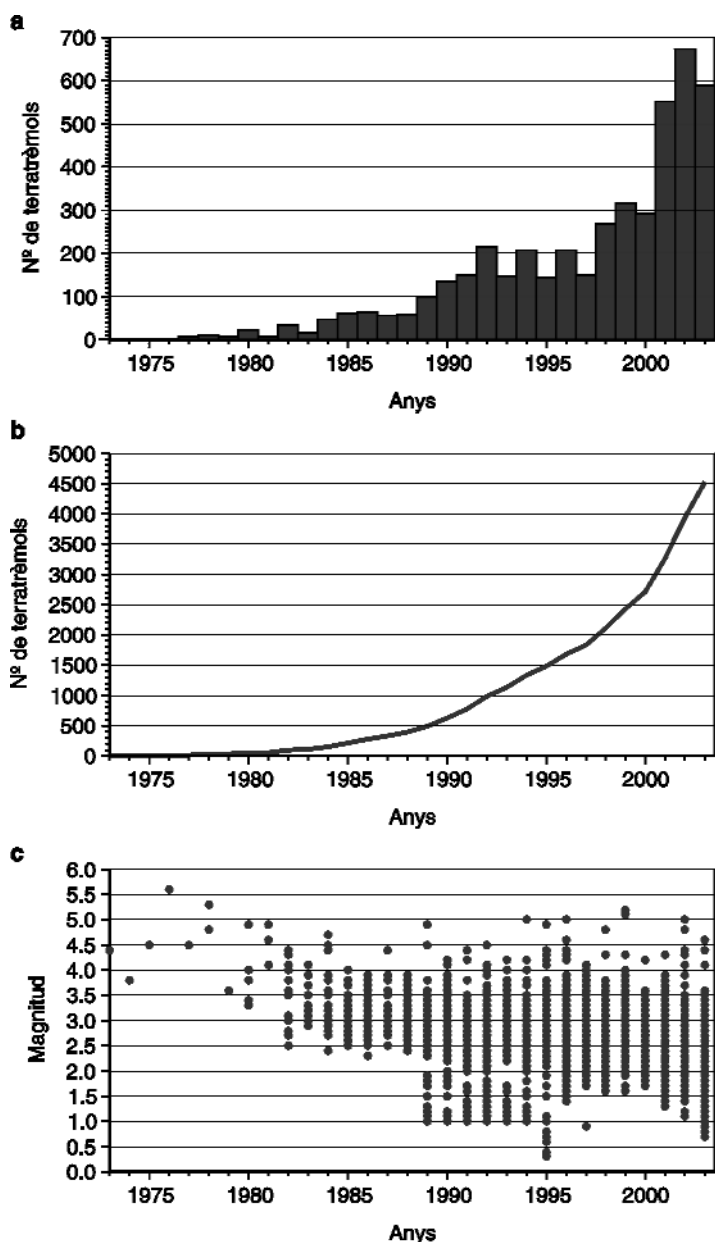


Figura 4.15. Anàlisi del catàleg del PDE. a) Histograma de la distribució anual de terratrèmols. b) Nombre acumulat de terratrèmols per any. c) Diagrama de dispersió de les magnituds per any.

Analysis of the PDE catalog. a) Histogram of the earthquake distribution per year. b) Cumulative number of earthquakes per year. c) Dispersion diagram of magnitudes per year.

local), tot i que també es donen en m_b (magnitud del cos d'ona), M_s (magnitud de l'ona superficial), M_D (magnitud durada), M_n (magnitud bLg) o UK (magnitud desconeguda). Hi ha un total de 1147 terratrèmols que no tenen magnitud assignada.

Tot i que el catàleg PDE cobreix un període de temps curt, s'hi poden distingir diferents períodes. A l'histograma de la distribució anual de terratrèmols (figura 4.15a) s'hi poden arribar a distingir fins a quatre moments on es produeix un increment notable de la quantitat de dades enregistrades. El primer es localitzaria a la meitat dels anys vuitanta, el segon al començament dels noranta, el tercer al final dels noranta i el quart al començament del segle XXI. Aquestes quatre períodes també es poden arribar a distingir al gràfic del nombre de terratrèmols acumulats per anys (figura 4.15b) ja que a cada un d'aquests moments es produeix un trencament del pendent de la corba. El diagrama de la dispersió de les magnituds per anys (figura 4.15c) mostra que el catàleg PDE es podria considerar complet per a magnituds superiors a 3.0 des de l'inici dels anys vuitanta i per a magnituds superiors a 2.5 des de finals de la mateixa dècada.

El catàleg PDE, de la mateixa forma que el de l'IGN, cobreix tota l'àrea d'interès (figura 4.16). La distribució geogràfica dels terratrèmols d'aquest catàleg mostra que les zones més actives serien els Pirienus i la zona nord-oriental de les Bètiques, de la mateixa forma que els catàlegs analitzats anteriorment. També mostra que a la zona de les Cadenes Costaneres Catalanes l'activitat és entre baixa i moderada i que la zona de la conca de l'Ebre és la zona menys activa.

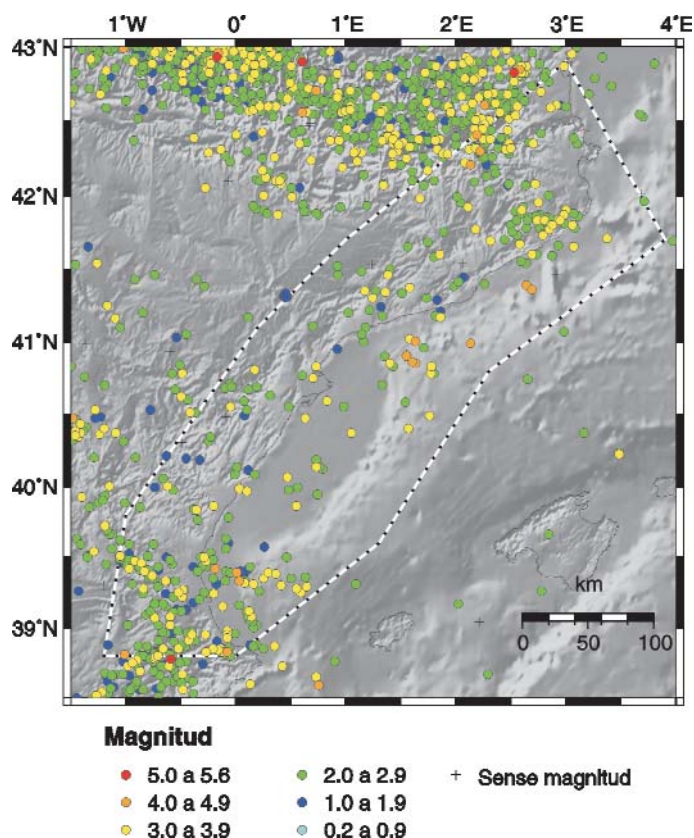


Figura 4.16. Distribució geogràfica dels terratrèmols del catàleg del PDE. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

Geographical distribution of earthquakes of the PDE catalog. The white line with black dots bounds the study zone.

Catàleg ISC

L'ISC disposa d'un catàleg internacional on registra i recopila terratrèmols al voltant de tot el món a partir de la informació que obté de les diverses xarxes sísmiques nacionals o regionals. El catàleg ISC cobreix un període de temps que va des de 1964 i fins al 2001. L'inici d'aquest catàleg coincideix amb l'establiment de la xarxa sísmica mundial, la *Worldwide Standard Seismograph Network* (WWSSN), fet que marca l'inici del període modern dins de la història de la sismicitat a la Terra. El nombre de terratrèmols corresponents a la zona del marge nord-occidental del solc de València presents al catàleg ISC és molt baix, només n'hi ha 32 dels quals tant sols 14 tenen magnitud assignada i no sempre donada en la mateixa escala (taula 4.1). El rang de magnituds va de 2.9 a 5.3. La distribució geogràfica dels terratrèmols (figura 4.17) mostra que la majoria dels terratrèmols enregistrats estan localitzats a la zona dels Pirineus i de las Bètiques, coincidint amb la distribució observada als altres catàlegs.

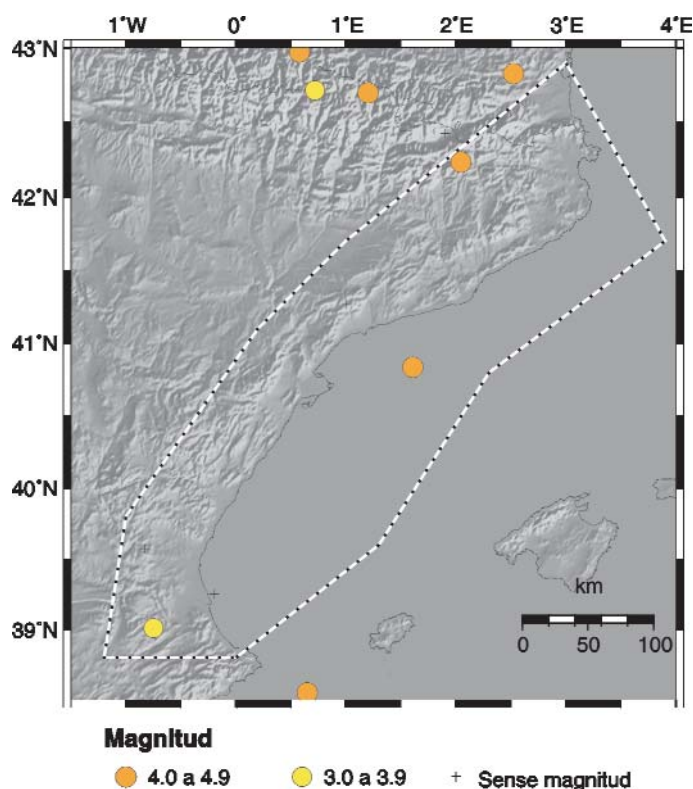


Figura 4.17. Distribució geogràfica dels terratrèmols del catàleg de l'ISC. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

Geographical distribution of earthquakes of the ISC catalog. The white line with black dots bounds the study zone.

4.3.1.2. Fusió de catàlegs

Després de la recopilació i l'anàlisi per separat de cada un dels catàlegs cal fusionar-los en un de sol amb la finalitat de tenir el màxim nombre de terratrèmols localitzats a la zona d'estudi. Abans de realitzar aquest pas s'ha d'establir quin és el catàleg que es prefereix i l'ordre en què la resta s'aniran considerant. En aquests estudi el criteri seguit per a la barreja de catàlegs ha estat diferent depenent del tipus de dades de les que es disposava, és a dir si eren terratrèmols del període pre-instrumental o de l'instrumental.

En el cas del període instrumental el catàleg que s'ha establert com a base del catàleg final ha estat el de l'IGN, seguit per l'ICC-I i pel PDE. Aquesta elecció està basada en: a) l'àrea coberta per cada catàleg; b) el període de temps cobert pel catàleg; i c) la provinença de les dades. S'ha preferit en primer lloc el catàleg de l'IGN perquè és un catàleg que abasten tota l'àrea d'estudi, dóna informació per a tot el període instrumental, ja que té terratrèmols enregistrats des de principis del segle XX, i les dades provenen principalment de la seva pròpia xarxa sísmica, tot i que complementa les seves dades amb les provinents d'altres institucions entre elles l'ICC. En segon lloc s'ha preferit el catàleg ICC-I al PDE, tot i que el PDE cobreix més àrea i els dos abasten aproximadament la mateixa franja temporal, perquè l'ICC té la seva pròpia xarxa sísmica i tenint en compte que els terratrèmols que caracteritzen la zona d'estudi són normalment de magnitud baixa és més probable que aquests estiguin enregistrats en un catàleg regional que no en un de mundial, tenint en compte el tipus de xarxa sísmica. El Catàleg PDE s'utilitzarà bàsicament per complementar la informació dels altres dos catàlegs. El catàleg del ISC no s'ha tingut en compte ja que tots els terratrèmols que reporta estan també als altres.

En el cas del període pre-instrumental el catàleg que s'ha establert com a base ha estat el de l'ICC-M ja que aquest catàleg és el resultat d'un estudi detallat fet per l'ICC i publicat a l'**Atlas Sísmic de Catalunya-Volum 1** (Susagna i Goula, 1999). De totes maneres, com ja s'ha vist, el catàleg ICC-M només cobreix una part de l'àrea d'estudi, per tant, el catàleg de l'IGN s'utilitzarà per cobrir les zones no incloses en el primer.

El catàleg resultant de la fusió conté un total de 9098 terratrèmols (taula 4.2), dels quals 595 pertanyen al període pre-instrumental (del 880 BC fins al 1899), 843 als inicis del període instrumental (del 1900 fins al 1963) i 7660 al període instrumental modern (del 1964 fins al 2003). En

Institucions	Pre-instrumental (800 BC-1899)	Inicis de la instrumental (1900-1963)	Instrumental moderna (1964-2003)	Nº total de terratrèmols
IGN	290	843	3294	4427
ICC	305		2551	2856
PDE			1815	1815
Nº total de terratrèmols	595	843	7660	9098

Taula 4.2. Nombre de terratrèmols corresponents a cada un dels períodes en que es divideix el coneixement de la història sísmica per a cada un dels catàlegs utilitzats. Quan no s'indica el nombre de terratrèmols significa que el catàleg de la institució no té terratrèmols registrats per aquest període.

Number of earthquakes corresponding to each era in which is divided the knowledge of the Earth seismicity for each of the used catalogs. When the number of earthquakes is not reported means that the catalog of this institution does not have registered earthquakes corresponding to that era.

aquest catàleg la quantitat de terratrèmols registrats dins de cada període no es homogènia, el període instrumental modern destaca clarament per sobre dels altres, tot i abastar un rang de temps molt menor (taula 4.2).

4.3.1.3. Unificació de l'escala de magnituds i transformació d'intensitats a magnituds

Després de la fusió dels catàlegs cal convertir les magnituds donades en diferents escales i intensitats a una única escala de magnitud. Com ja s'ha comentat els diferents catàlegs donen la mida dels terratrèmols en diferents escales de magnitud (taula 4.3). La conversió a una única escala de magnitud es fa a través de la comparació entre les diferents escales que hi ha i anàlisi de regressió. Per la realització de les regressions és necessari que hi hagi un cert nombre de terratrèmols per als quals es disposi de seva magnitud en escales diferents. L'anàlisi s'ha realitzat primer comparant totes les escales de magnitud entre si (per exemple, m_{bLg} respecte a M_l) i després comparant les diferents escales donades per les diferents institucions (per exemple, m_{bLg} IGN respecte a M_l ICC). La comparació entre les escales de magnitud provinents de diferents institucions permet decidir si és millor convertir la mateixa escala de magnitud donada per dues institucions diferents utilitzant una única relació de conversió o, d'altra banda, utilitzar diferents relacions per cada una de les institucions. A l'annex 2 es mostra les 15 regressions realitzades.

L'escala de magnitud que s'ha seleccionat per a la totalitat del catàleg ha estat m_{bLg} perquè és la magnitud predominant entre els terratrèmols que hi ha al catàleg (taula 4.3) i, a més, no s'espera que presenti problemes de saturació donat el tipus de sismicitat que caracteritza l'àrea d'estudi. També es podria haver triat M_l com l'escala de magnitud del catàleg tenint en compte que hi ha un gran nombre de terratrèmols donats en aquesta escala. De totes formes, la regressió entre la M_l de l'ICC i la del PDE (figura 4.18) mostra que el valor donat pel PDE sol ser més alt que el donat per l'ICC per magnituds menors de 3.0. Per tant, la M_l del PDE i la de l'ICC s'haurien de considerar com escales de magnitud diferents i no com a una de sola. La taula 4.4 mostra les relacions utilitzades per convertir les diferents escales de magnitud presents al catàleg a m_{bLg} . S'ha decidit no transformar ni m_b ni M_D (taula 4.3) a causa de la mala correlació que presenten amb m_{bLg} . A més, tots els terratrèmols donats amb aquestes dues escales estan localitzats als Pirineus, zona que està molt ben coberta pel catàleg final.

Institucions	Pre-instrumental (399-1899) MSK			Instrumental (1900-2003)						Nº total de terratrèmols
	Sense intensitat	Amb intensitat	Sense magnitud	M_{blg}	ML	Mn	MK	MD	mb	
IGN	179	111	782	3355	x	x	x	x	x	4427
ICC	165	140	480	x	2071	x	x	x	x	2856
PDE	x	x	41	x	1259	374	1	138	2	1815
Nº total de terratrèmols	344	251	1303	3355	3330	374	1	138	2	9098

Taula 4.3. Nombre de terratrèmols corresponents als períodes pre-instrumental i instrumental. S'ha indicat el nombre de terratrèmols amb i sense intensitat o magnitud assignada per cada catàleg.

Number of earthquakes corresponding to the pre-instrumental and instrumental eras. The number of earthquakes with and without intensity or magnitude information has been indicated for each institution.

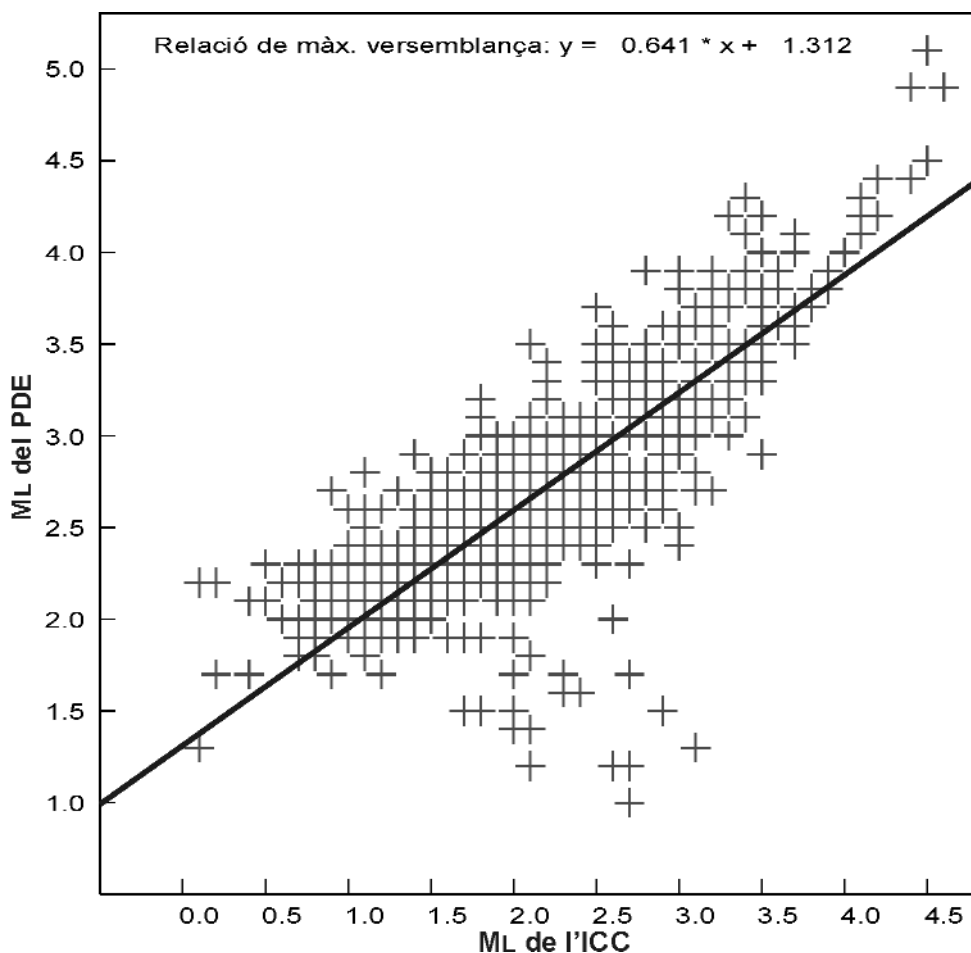


Figura 4.18. Regressió lineal entre la magnitud M_i del ICC i la M_i del PDE. Tot i que la magnitud està donada en la mateixa escala es pot veure que per les magnituds inferiors a 3.0 la M_i del PDE normalment és superior a la del ICC.

Linear regression between magnitude M_i of ICC and M_i of PDE. Although the magnitude is given in the same scale for both institutions, it can be seen that for magnitudes lower than 3.0 M_i for PDE usually gives higher values than ICC.

Relació entre magnituds		Correlació	Nº de dades
mblg a partir de M_i ICC	$mblg = 0.671 * M_i(ICC) + 1.083$	0.8422998	1088
mblg a partir de M_i PDE	$mblg = 0.823 * M_i(PDE) + 0.407$	0.7832369	975
mblg a partir de M_n PDE	$mblg = 0.989 * M_n(PDE) + 0.025$	0.9894316	590
mblg a partir de M_K PDE	$mblg = 1.015 * M_K(PDE) - 0.10$	0.8626460	37
mblg a partir de M_D PDE	$mblg = 0.432 * M_D(PDE) + 1.594$	0.6195163	39
mblg a partir de m_b PDE	$mblg = 1.139 * m_b(PDE) - 0.885$	0.5024850	24

Taula 4.4. Relacions utilitzades per convertir les diferents magnituds a magnitud $mblg$.

Relationships used to convert the different magnitudes to magnitude $mblg$.

Després de la conversió de totes les magnituds a m_{bLg} el següent pas es convertir les intensitats donades als catàlegs a aquesta mateixa escala de magnitud. S'ha realitzat una anàlisi de regressió (figura 4.19) de la relació entre la intensitat i m_{bLg} d'aquells terratrèmols dels que es disposava dels dos tipus d'informació (620 terratrèmols). El coeficient de determinació obtingut és de 0.46, el que significa que la correlació no és gaire bona. Com es pot veure a la figura 4.19 la dispersió de les dades és força important, per exemple per la intensitat V la magnitud varia aproximadament entre 3.0 i 5.0, el que significa que l'error en l'estimació de la magnitud utilitzant la fórmula de regressió obtinguda seria aproximadament d'un grau de magnitud. Tot i així, aquests resultats estan d'acord amb els resultats donats per Johnston i Halchuk (1993) que també consideren que la qualitat d'aquestes dades és molt pobre. També s'han comparat els resultats obtinguts d'aquesta transformació amb els resultats que s'obtenen utilitzant la relació proposada per López Casado et al. (2000) per transformar intensitats epicentrals a magnitud m_{bLg} (figura 4.19). S'ha vist que en el rang d'intensitats entre III i VII els resultats són molt similars, tot i que a par-

Resultats de la correlació	Intensitat (MSK)	Magnitud (m_b)	Magnitud (López Casado et al., 2000)
Correlació 1: Lineal	2	2,93	3,13
Equació $Y = 0,2992431429 * X + 2,327778398$	3	3,23	3,29
Número de dades utilitzades = 620	4	3,52	3,51
Mitjana $X = 3,67097$	5	3,82	3,80
Mitjana $Y = 3,42629$	6	4,12	4,15
Suma residual dels quadrats = 97,362	7	4,42	4,57
Regressió de la suma dels quadrats = 82,8195	8	4,72	5,05
Coef. de determinació, $R\text{-squared} = 0,459594$	9	5,02	5,59
Quadrat de la mitjana residual, $\sigma\text{-hat-sq} = 0,157576$	10	5,32	6,20

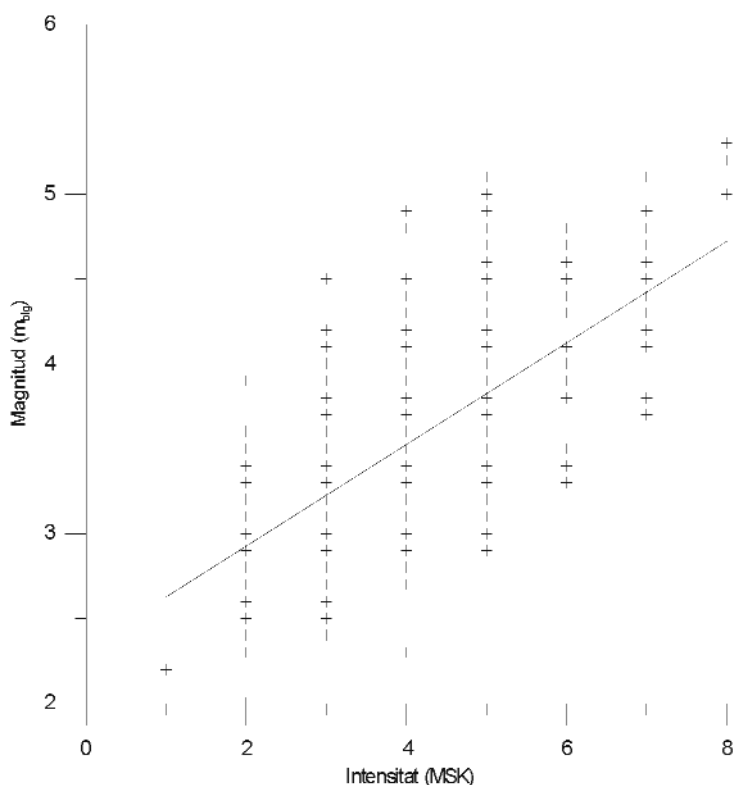


Figura 4.19. Regressió lineal per transformar les intensitats MSK a magnitud m_{bLg} . Es pot observar com per un mateix grau d'intensitat la magnitud pot variar àmpliament, més de dues unitats per algunes intensitats.

Lineal regression to transform intensity MSK to magnitude m_{bLg} . Notice that for one degree of intensity magnitude can widely vary, more than two units for some intensities.

tir de VII la diferència entre ambdues relacions es va fent cada cop més marcada, sent de 0.3 graus per intensitat VIII i arribant a divergir gairebé un grau per intensitat X. Tot i així, s'ha triat la transformació obtinguda en aquest estudi a causa de la poca discrepància entre ambdues a la banda d'intensitats entre III i VII, on hi ha la gran majoria de terratrèmols per als quals s'ha de calcular la magnitud (175 de 194) i perquè ha estat realitzada únicament amb els terratrèmols d'aquesta zona d'estudi.

L'últim pas en la conversió de magnituds és l'assignació d'una magnitud als terratrèmols pre-instrumentals per als quals la intensitat no ha estat reportada al catàleg. S'ha decidit assignar una magnitud de 4.5 a aquest terratrèmols. Aquesta decisió es basa en el pensament que un terratrèmol hauria de tenir una intensitat de com a mínim VII per haver quedat enregistrat als catàlegs pre-instrumentals. A partir de la regressió obtinguda anteriorment per transformar les intensitats a m_{BLg} s'ha vist que considerar una magnitud mínima de 4.5 és raonable. Aquests terratrèmols s'utilitzaran per calcular el paràmetre a de la relació de recurrència dels terratrèmols, tot i que a causa de la seva baixa qualitat aquestes dades no s'utilitzaran per al càlcul del paràmetre b d'aquesta mateixa relació.

4.3.1.4. Extracció de premonitoris, rèpliques i sismes artificials

L'últim pas, abans d'obtenir el catàleg final i procedir a l'anàlisi de la perillositat sísmica, és l'extracció dels premonitoris, les rèpliques, els sismes falsos i els artificials. Aquest pas s'ha de fer perquè l'anàlisi probabilista que es realitzarà assumeix un comportament poissonià de la recurrència dels terratrèmols, el que significa que els terratrèmols no tenen memòria, en altres paraules, que l'ocurrència d'un terratrèmol no té cap relació amb l'ocurrència d'un terratrèmol anterior o un de posterior. Conseqüentment, tots els terratrèmols que tinguin una relació directe entre ells (rèpliques i premonitoris) s'han de suprimir del catàleg. En aquest sentit, han estat esborrats del

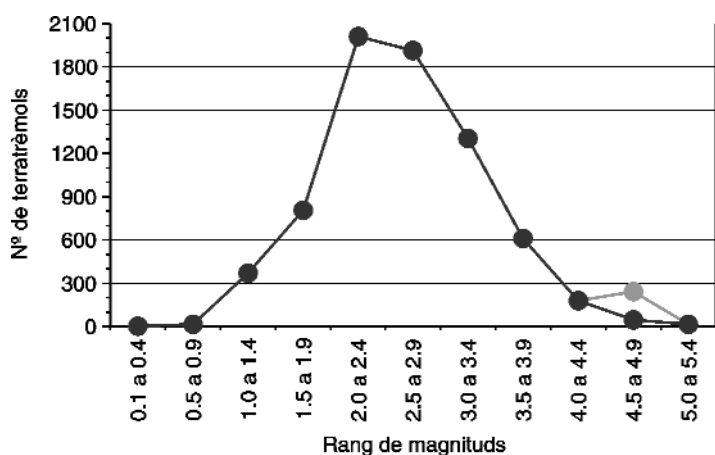


Figura 4.20. Distribució del nombre de terratrèmols corresponents al catàleg final per diferents rangs de magnituds on es pot observar la variació que suposa considerar els terratrèmols que no tenien intensitat assignada (línia gris clara).

Distribution of the number of earthquakes corresponding to the final catalog for different magnitude ranges where it can be seen the variation produced by the inclusion of the earthquakes without intensity assigned (light gray line).

catàleg final tots els terratrèmols que havien estat marcats com premonitoris o rèpliques per les pròpies institucions de les quals procedeixen. Els sismes reportats com falsos també s'han tret. A causa de la manca d'informació no s'han exclòs els possibles sismes artificials produïts per explosions.

4.3.1.5. Catàleg final

Tota la feina realitzada fins a aquest punt ha donat com a resultat un catàleg que abasta un període de temps que va des de l'any 880 AC fins a l'any 2003. D'aquesta forma el catàleg cobreix tots els períodes en els que es divideix el coneixement de la sismicitat a la Terra (Johnston i Halchuk, 1993). El catàleg està constituït per un total de 7452 terratrèmols, tots amb una mateixa escala de magnitud, m_{bLg} . Si el dividim per períodes, hi ha 386 terratrèmols que corresponen al període pre-instrumental, 566 als principis de l'instrumental i 6500 al modern. El rang de magnituds està comprès entre 0.4 i 5.3 amb el màxim nombre de terratrèmols comprès entre les magnituds 2.0 i 2.9 (figura 4.20). La distribució geogràfica dels terratrèmols (figura 4.21) mostra que el catàleg final cobreix tot el marge nord-oriental del solc de València i concorda amb els catàlegs de les diferents institucions respecte a la localització de les zones amb més densitat de terratrè-

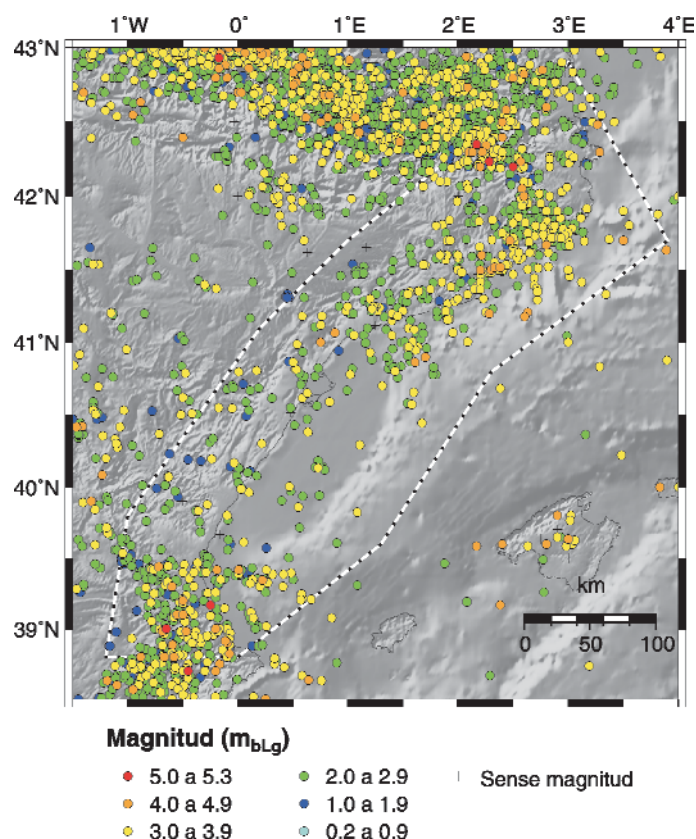


Figura 4.21. Distribució geogràfica dels terratrèmols del catàleg final. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

Geographical distribution of earthquakes of the final catalog. The white line with black dots bounds the study zone.

mols. Es pot veure clarament que les zones amb més densitat de terratrèmols i, per tant, més actives són els Pirineus, el nord de les Cadenes Costaneres Catalanes i les Bètiques, sent la zona de la conca de l'Ebre la que mostra una menor densitat.

L'histograma del nombre de terratrèmols per any (figura 4.22) mostra que hi ha un espectacular increment en la quantitat de sismes enregistrats a partir de finals de la dècada dels setanta, que continua fins l'actualitat. Aquest mateix comportament es pot observar a les corbes del nombre acumulat de terratrèmols per any (figura 4.23), on s'observa que a partir de mitjans dels setanta la quantitat de dades creix molt ràpidament, fet que queda marcat per un canvi bruscat de

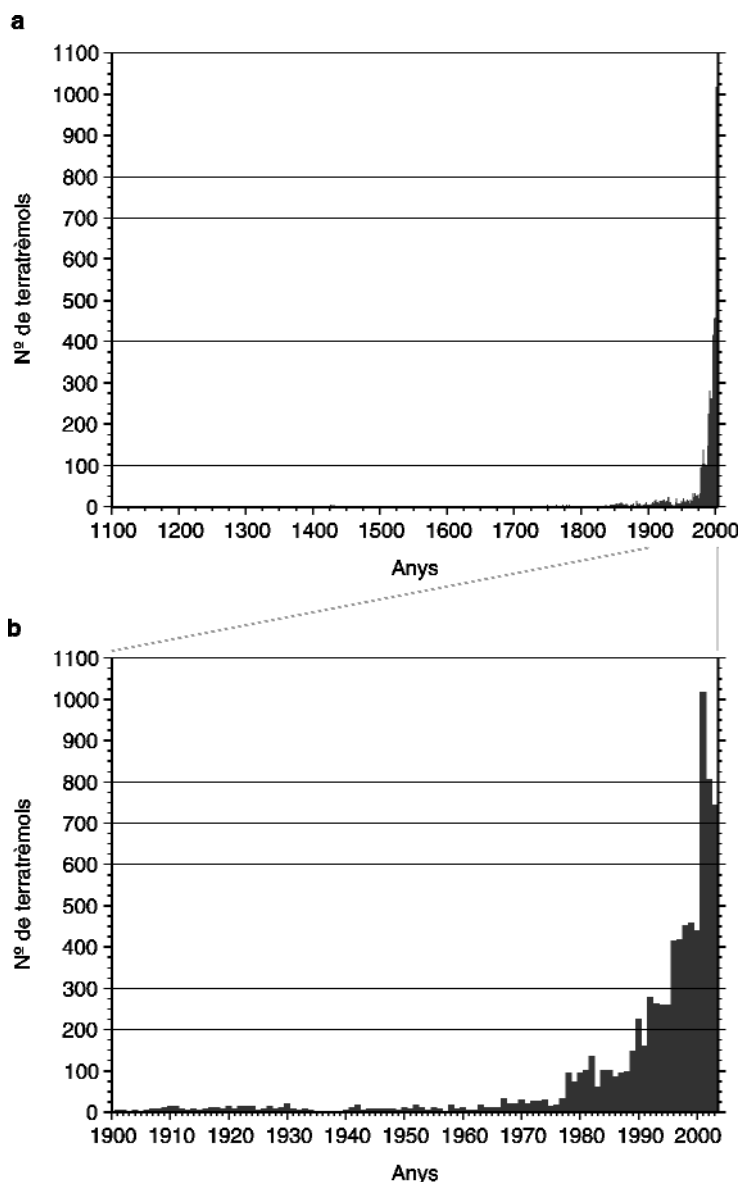


Figura 4.22. Anàlisi del catàleg de terratrèmols final. Histograma de la distribució anual dels terratrèmols registrats entre el 1100 i el 2003 (a) i entre el 1900 i el 2003 (b).

Analysis of the final earthquakes catalog. Histogram of the annual distribution of the earthquakes registered between 1100 and 2003 (a) and between 1900 and 2003 (b).

pendent a la corba. Els diagrames de la distribució de les magnituds per any (figura 4.24) mostren que el catàleg es podria considerar complet per magnituds superiors a 4.5 en la seva totalitat, per sobre de 4.0 des del segle XVIII, per sobre de 3.5 des de començaments del segle XX, per sobre de 3.0 des de 1960 i per sobre de 2.5 des de 1980. Per magnituds inferiors a 2.5 s'hauria de considerar incomplet. Aquesta mateixa conclusió es podria treure de la figura 4.20 on el pendent de la corba es ascendent i aproximadament homogeni fins al rang de magnituds entre 2.5 i 2.9 el que significa que es manté la proporcionalitat entre els sismes grans i els petits. A la figura 4.24, sobretot pel període pre-instrumental, es poden veure unes clares alineacions de terratrèmols corresponents a magnituds (m_{BLg}) de 2.9, 3.2, 3.5, 3.8, 4.1, 4.4, 4.5, 4.7 i 5.0. Aquestes magnituds

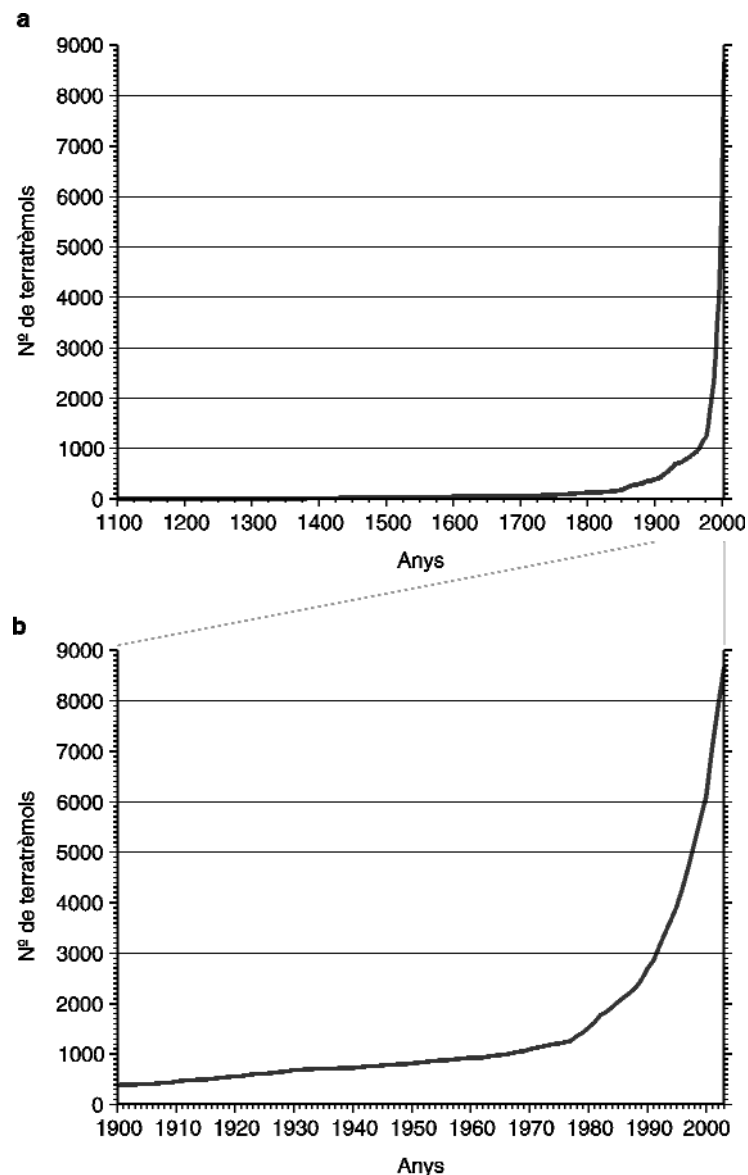


Figura 4.23. Anàlisi del catàleg de terratrèmols final. Nombre acumulat de terratrèmols per any registrats entre el 1100 i el 2003 (a) i entre el 1900 i el 2003 (b).

Analysis of the final earthquakes catalog. Cumulative number of earthquakes per year registered between 1100 and 2003 (a) and between 1900 and 2003 (b).

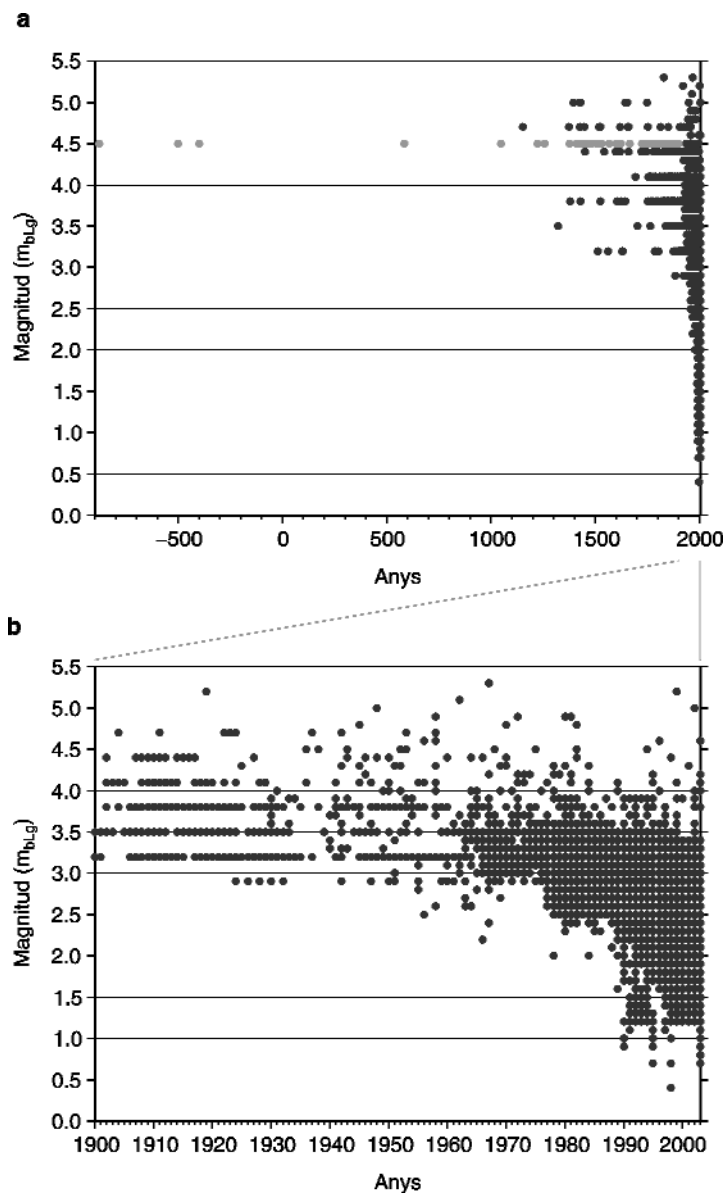


Figura 4.24. Anàlisi del catàleg de terratrèmols final. Diagrames de dispersió de les magnituds per any dels terratrèmols registrats entre el 1100 i el 2003 (a) i entre el 1900 i el 2003 (b). Els punts gris clar corresponen als terratrèmols que al catàleg original no tenien intensitat assignada i se'ls ha assignat intensitat 4.5.

Analysis of the final earthquakes catalog. Dispersion diagram of the distribution of the earthquakes per year registered between 1100 and 2003 (a) and between 1900 and 2003 (b). The light gray circles correspond to the earthquakes without intensity in the original catalog and to whom an intensity of 4.5 has been assigned.

són les que corresponen als terratrèmols pre-instrumentals donats amb intensitat als quals se'ls ha assignat una magnitud. Depenent de les magnituds de tall que es vulguin considerar a l'estudi de perillositat, l'estudi de completitud hauria de ser més detallat per acotar de forma més exacte els períodes de completitud per cada magnitud.

4.3.2. Definició de les fonts areals

La definició de les fonts areals consisteix en la definició de zones que poden ser fonts homogènies de terratrèmols susceptibles d'afectar una localitat concreta. Al marge nord-occidental del solc de València s'han triat com a fonts areals les zones sismotectòniques definides per l'ICC (figura 4.25) per l'estudi de perillositat sísmica a Catalunya fet que permetrà comparar entre els resultats obtinguts en ambdós estudis (Goula, 2001; Secanell et al., 2004). De totes formes s'han realitzat algunes modificacions d'aquesta fonts de cara a millorar la correlació entre les diferents zones i les principals estructures geològiques observades, principalment, a la part sud de l'àrea d'estudi (figura 4.26). A continuació es descriuen les fonts areals que han estat modificades i els criteris seguits per fer-ho.

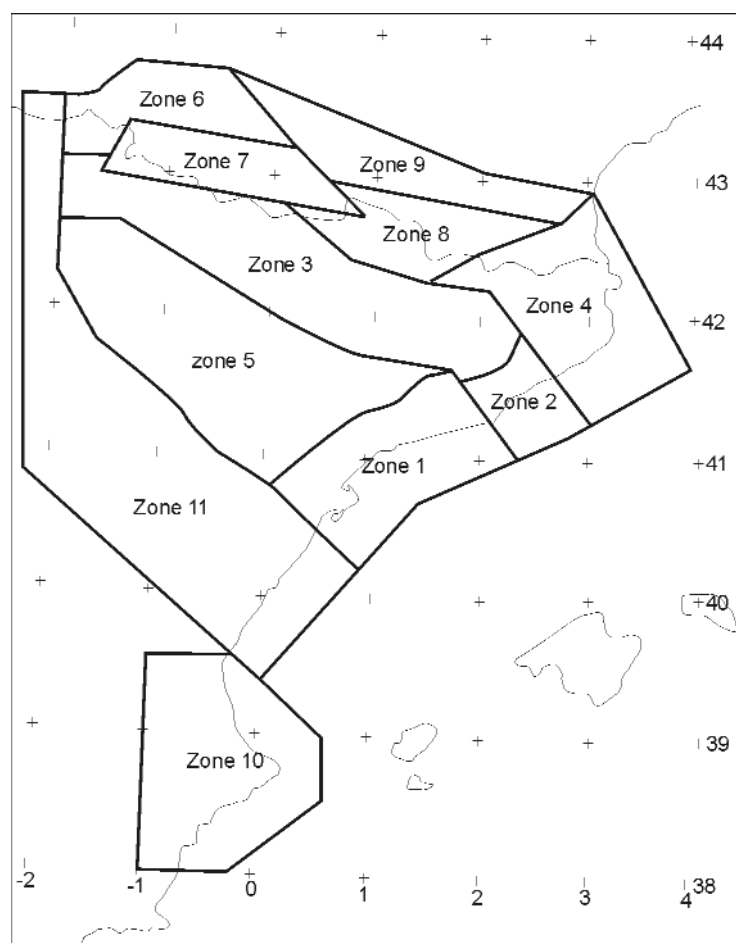


Figura 4.25. Zonació sismotectònica de l'ICC (Goula, 2001; Secanell et al., 2004).

ICC seismotectonic zonation (Goula, 2001; Secanell et al., 2004).

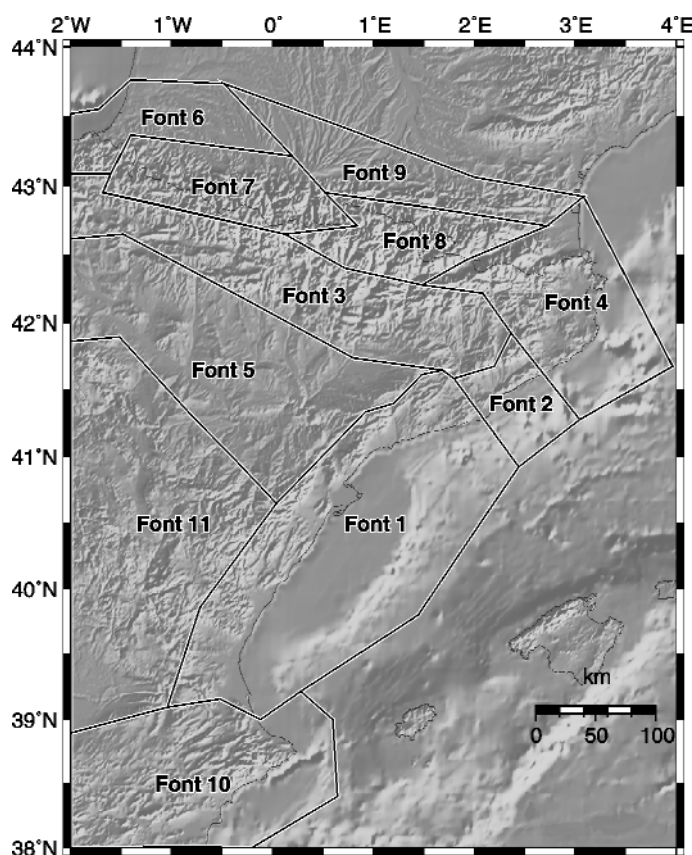


Figura 4.26. Mapa amb la distribució de les fonts areals utilitzada en aquest estudi de perillositat sísmica. Aquesta distribució deriva de la zonació realitzada per l'ICC (figura 4.25) amb algunes modificacions.

Map with the distribution of the area sources used in this study. This distribution derives from the ICC zonation (figure 4.25) with some modifications.

La **font 1** es localitza a la part centro-oriental de la zona d'estudi (figura 4.26). Comparant-la amb la zona 1 definida per l'ICC (figura 4.25) aquesta s'ha allargat cap al sud i cap a l'est, seguint la direcció de les estructures extensives del solc de València i l'encavalcament frontal de les Bètiques respectivament. Donat que la posició dins del solc de l'encavalcament frontal de les Bètiques no està ben coneguda al nord del punt 40°N 1.5°E, des d'aquest punt i cap al nord el límit de la zona s'ha dibuixat fent-lo coincidir amb el vèrtex sud de la zona 2.

La **font 5** es localitza a la part centre-occidental de la zona d'estudi (figura 4.26). Els límits d'aquesta font es corresponen amb els donats per l'ICC (figura 4.25) tot i que s'ha modificat el límit sud per adaptar-lo al front septentrional de la serralada Ibèrica.

La **font 10** està localitzada al sud de la zona d'estudi coincidint amb el front nord de les Bètiques (figura 4.26). Respecta a la zona sismotectònica proposada per l'ICC (figura 4.25) s'ha modificat el límit nord per adaptar-lo a la disposició de les estructures geològiques predominants a la zona, tractant de diferenciar entre la zona on predominen les estructures extensives relacionades amb el solc de València i aquella on predominen les estructures compressives relacionades amb les Bètiques.

La **font 11** es localitza a la part centro-occidental de l'àrea d'estudi (figura 4.26). Aquesta és la

font que ha sofert més modificacions respecte a la zona donada per l'ICC (figura 4.25), ja que s'han modificat els límits nord, sud i est. Els dos primers s'han establert seguint els límits de la serralada Ibèrica i de les Bètiques, respectivament. El límit est s'ha situat seguint les principals estructures extensives que limiten la part occidental de la depressió de València.

4.3.3. Paràmetres sísmics de la relació de recurrència

La relació de recurrència de terratrèmols per una font dona la probabilitat d'ocurrència de terratrèmols d'una certa mida a qualsevol punt al interior d'aquesta font durant un període de temps específic. Aquesta relació bé donada per l'equació 4.2 ja comentada a l'apartat 4.2.2 d'aquest capítol.

Els paràmetres **a** i **b** de la relació de recurrència (equació 4.2) per a cada una de les zones sistotectòniques s'han calculat utilitzant el programa BVALUE del paquet informàtic SEISAN (Havskov i Ottemöller, 2001). Els paràmetres **a** i **b** s'han calculat fent servir dues versions diferents del catàleg de terratrèmols. En primer lloc per calcular el paràmetre **b** s'ha utilitzat el catàleg que no inclou els terratrèmols del període pre-instrumental dels que no es té la intensitat i als quals s'ha assignat una magnitud de 4.5. Això es fa perquè la inclusió d'aquests terratrèmols podria produir un increment artificial del nombre de terratrèmols per a les magnituds grans i canviar el valor real del paràmetre **b**. D'altra banda, per calcular el paràmetre **a** si que s'han tingut en compte aquests terratrèmols, però al càlcul de la regressió s'ha fixat el valor de **b**. Això és fa tenint en compte que aquests han de ser uns terratrèmols relativament importants que s'han produït a la zona i que s'haurien de tenir en compte alhora de calcular la taxa d'activitat i fent-ho d'aquesta forma el paràmetre **b** no sofreix cap variació.

Hi ha dues consideracions que s'han de tenir en compte abans d'utilitzar el programa BVALUE per obtenir els paràmetres **a** i **b** de la relació de recurrència. La primera és l'interval de magnitud que s'ha d'utilitzar. Aquí s'ha utilitzat un interval de 0.2 unitats de magnitud ja que s'ha vist que no es produïen gaires forats per manca de terratrèmols dins d'un determinat rang i si n'hi havia aquests es localitzaven en els rangs de les magnituds altes, les quals es consideren completes per a tot el catàleg. La segona consideració a tenir en compte és la magnitud mínima i màxima que s'haurien de tenir en compte per calcular aquests paràmetres. El límit superior ha coincidit sempre amb la màxima magnitud registrada a la zona, mentre que com a límit inferior s'ha agafat la magnitud a partir de la qual l'histograma on es relacionen la magnitud dels terratrèmols amb el nombre acumulat de terratrèmols d'una magnitud i superiors, esdevenia pla. Per exemple per la zona 1 (figura 4.27) el rang de magnituds va de 2.8 a 5.2, on 5.2 és la magnitud màxima enregistrada a la zona i 2.8 és la magnitud a partir de la que el diagrama de magnituds acumulades mostra una disminució del pendent.

La definició dels límits inferior i superior de la magnitud dels terratrèmols per a la que es realitzaran els càlculs és un pas important en els estudis de perillositat. La magnitud mínima seleccionada per a realitzar el càlcul de la perillositat sísmica és 4.5. S'ha triat aquesta magnitud per dues raons: a) perquè des del punt de vista d'un enginyer aquesta és la magnitud mínima a partir de la qual un terratrèmol s'espera que causi danys als edificis, tot i que en algunes zones aquesta magnitud pot ser inferior; i b) perquè és la magnitud mínima per a la qual s'ha considerat que tot el catàleg recopilat per a la zona d'estudi seria complet, fet que dona la possibilitat d'utilitzar tots els terratrèmols enregistrats a la zona per calcular la perillositat sísmica. En el cas que es volgués calcular la perillositat per magnituds inferiors s'haurien de realitzar estudis de com-

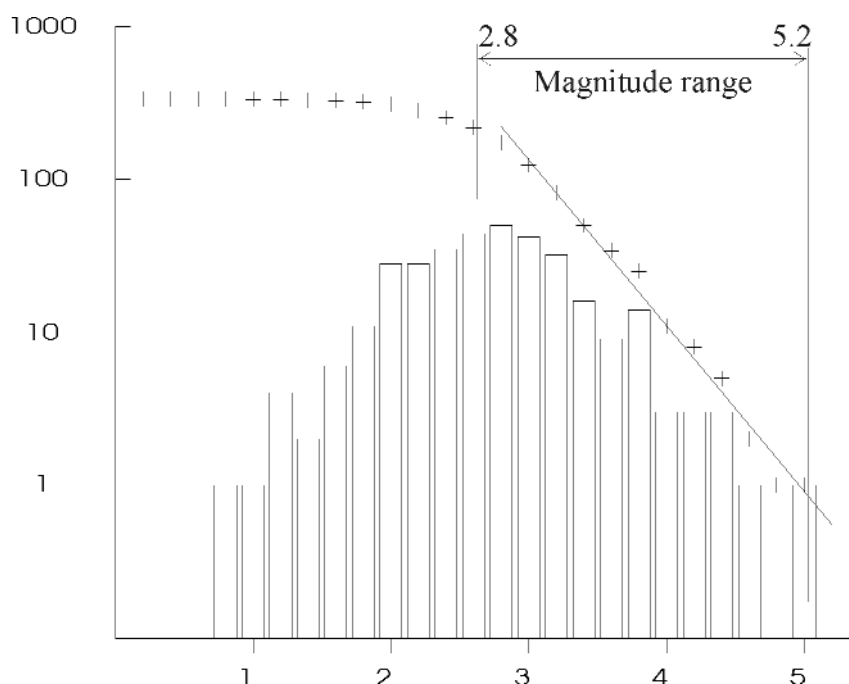


Figura 4.27. Diagrama de barres del nombre de terratrèmols per cada rang de magnituds i superiors corresponents a la font areal 1. Es mostra la recta corresponent a la relació de recurrència obtinguda per aquesta zona i el rang de magnituds considerat per obtenir aquesta relació.

Bar diagram of the numbers of earthquakes for a range magnitude and above corresponding to the area source 1. It is shown the curve corresponding to the derived recurrence relationship to this zone and the magnitude range used to obtain this relationship.

pletitud més detallats per aquestes magnituds i per cada zona sismotectònica de cara a obtenir el rang de temps en el qual el catàleg de terratrèmols s'hauria de considerar complet.

La magnitud màxima que es pot esperar en una zona és, probablement, un dels paràmetres més complicats d'obtenir en una zona caracteritzada per una baixa taxa de deformació i, conseqüentment, per una sismicitat entre baixa i moderada. Normalment, la magnitud màxima hauria de correspondre al màxim terratrèmol enregistrat en una zona. De totes formes, a les zones amb baixes taxes de deformació la probabilitat que el màxim terratrèmol s'hagi produït i hagi estat enregistrat als catàlegs és molt baixa. La zona sismotectònica número 1 és un clar exemple d'aquest fet. El màxim terratrèmol enregistrat a la zona té una magnitud de 5.0. D'altra banda, estudis paleosismològics duts a terme a la falla del Camp (comentats al punt 3.4 del capítol 3), falla localitzada a aquesta zona, han demostrat que aquesta és una falla que pot arribar a produir terratrèmols d'una magnitud màxima de 6.7 (Masana et al., 2000, 2001a i 2001b; Santanach et al., 2001; Perea et al., 2003). Per tant, l'ús de la màxima magnitud enregistrada sísmicament pot donar com a resultat una estimació de la perillositat per sota dels valors que s'obtidrien utilitzant la informació obtinguda a partir dels estudis geològics. Tot i això, l'ús de magnituds tant altes com les que s'obtenen per la falla del Camp per a altres fonts sense tenir suficients evidències pot comportar una sobreestimació de la perillositat a les altres zones. En aquest estudi s'ha decidit afegir 0.5 graus de magnitud al terratrèmol màxim enregistrat a cada zona (Yeats et al., 1997). Les fonts 1, 4 i 5 són excepcions. En el cas de les fonts 1 i 4 es disposa d'informació paleosismològica i geològica que suggereix que algunes falles situades a aquestes fonts poden produir terratrèmols amb una magnitud màxima de 6.7 i 6.6 respectivament i, per tant, s'han utilitzat

aquestes magnituds com la magnitud màxima. El cas de la font 5 és diferent, a aquesta font el màxim terratrèmol enregistrat té una magnitud de 3.8 i si se li suma els 0.5 graus obtenim una magnitud màxima esperable de 4.3. Tenint en compte que la magnitud mínima per a realitzar els càlculs de perillositat és 4.5 aquesta font no seria tinguda en compte, per evitar-ho s'ha decidit que la magnitud màxima esperable seria de 4.6.

Després de l'obtenció dels paràmetres **a** i **b** i de fixar les magnituds mínima i màxima per a cada zona sismotectònica, s'ha de calcular la taxa d'activitat (T_a), el nombre esperat de terratrèmols d'una determinada magnitud i per sobre d'aquesta que es produeixen en un any. Coneixent **a** i **b** i aïllant la **N** de l'equació 4.2 la taxa d'activitat es pot calcular de la següent forma:

$$N = 10 (a - bM) \quad \text{equació 4.3}$$

$$T_a = N / t \quad \text{equació 4.4}$$

on **t** és el rang d'anys en què per cada font i per una determinada magnitud el catàleg es considera complet. Per exemple, si, com en aquest cas, es considera que el catàleg és complet per magnituds iguals o superiors a 4.5 i en una de les zones aquest catàleg cobreix un període de temps de 300 anys, aleshores **t** serà igual a 300. Per la zona d'estudi, la taxa d'activitat correspondrà al nombre de terratrèmols de magnitud 4.5 o superior que es produeixen en cada una de les zones sismotectòniques anualment. La taula 4.5 mostra els paràmetres **a** i **b** i la taxa d'activitat obtinguts per cada font areal, així com les magnituds de tall que es consideraran als càlculs de perillositat. A l'annex 3 hi ha tots els gràfics utilitzats per calcular els paràmetres **a** i **b** per a cada una de les fonts.

Font	Nº de terratrèmols	Rang temporal (anys)	Rang de magnituds		Paràmetres de la relació de recurrència		Taxa d'activitat (mblg 4.5)	Terratrèmol màx. del catàleg	Terratrèmol màx. a partir d'estudis geològics	Terratrèmol màx. esperable
			Min	Max	a	b				
Font 1	334	606,7	2,8	5,2	5,2	1,01		5,0	6,7 (a)	6,7
Font 2	125	555,1	3,2	5,0	6,00	1,20		4,9		5,4
Font 3	342	151,5	3,0	5,0	6,64	1,42		4,7		5,2
Font 4	578	850,8	2,8	5,1	5,51	1,01		5,1	6,6 (b)	6,6
Font 5	68	115,2	2,4	4,5	4,60	1,04		3,8		4,6 (*)
Font 6	257	385,2	3,0	4,5	6,63	1,37		4,5		5,0
Font 7	2559	378,4	3,6	5,3	6,35	1,13		5,3		5,8
Font 8	1136	630,5	2,8	4,9	6,01	1,21		4,8		5,3
Font 9	396	240,5	2,8	4,7	6,05	1,29		4,7		5,2
Font 10	976	483,9	3,2	5,3	5,92	0,99	0,060	5,3		5,8
Font 11	173	347,3	2,8	4,7	4,77	0,94	0,010	4,7		5,2

(a) A partir dels estudis paleosismològics realitzats a la falla del Camp

(b) Calculat utilitzant la relació empírica de Wells and Coppersmith (1994): $M=4.86+1.32 \log(\text{SLR})$ per la falla d'Amer, falla responsable dels terratrèmols de l'any 1427.

(*) Anar al text per explicació

Taula 4.5. Paràmetres sísmics per a cada una de les fonts areals.

Seismic parameters for each areal source.

4.3.4. Models d'atenuació

L'últim pas abans d'iniciar els càlculs de perillositat sísmica és la definició dels models d'atenuació del moviment del terreny. Els models d'atenuació són els paràmetres que defineixen com un terratrèmol va perdent energia a mida que s'allunya de l'epicentre i, per tant, són paràmetres que tenen més gran influència en els resultats finals. En conseqüència, l'elecció d'un model d'atenuació correcte per una zona és un dels passos més crítics en els càlculs de perillositat sísmica. La millor opció seria l'obtenció d'un model pròpia per la zona de treball, però això és difícil en zones caracteritzades per una activitat sísmica entre baixa i moderada i on no s'han enregistrat grans terratrèmols durant el període instrumental. De forma alternativa, en zones on no hi ha suficient informació per obtenir models d'atenuació propis, s'utilitzen models desenvolupats a d'altres zones que mostren unes característiques sismotectòniques similars a les de la zona d'interès.

Com ja s'ha mencionat, el marge nord-occidental del solc de València és una zona caracteritzada per una activitat sísmica entre baixa i moderada. Conseqüentment, no és una zona on s'hagin pogut obtenir models d'atenuació propis per un ampli rang de magnituds i que al mateix temps tinguin en compte les magnituds més grans que es podrien donar. Per solucionar-ho, s'han utilitzat dos models d'atenuació diferents: a) un obtingut per Europa amb dades de la zona del Mediterrani per Ambraseys et al. (1996; Amb96 d'ara en endavant), i b) un obtingut per zones extensives per Spudich et al. (1999 Spu99 d'ara en endavant). La figura 4.28 mostra les corbes d'atenuació per magnituds de 4.0, 5.5 i 7.0 per a cada un dels models escollits. Si es comparen les cobres corresponents a ambdós models (figura 4.29) es pot veure com els resultats d'acceleració pic que dona Spu99 sempre estan per sota dels que dona Amb96 per a una mateixa magnitud i a una mateixa distància del focus del terratrèmol. Tenint en compte que els càlculs de la perillosi-

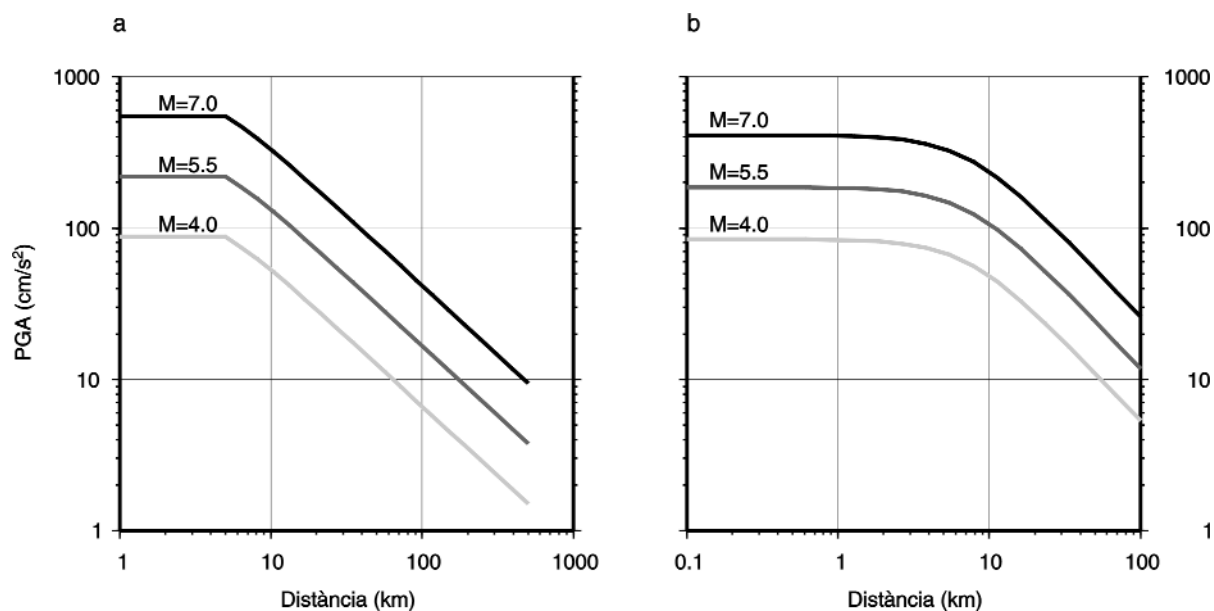


Figura 4.28. Gràfics dels diferents models d'atenuació utilitzats provinents dels estudis d'Ambraseys et al. (1996) realitzat per Europa (a) i de Spudich et al. (1999) realitzat en zones extensives (b).

Graphic of the different attenuation models used taken from the studies of Ambraseys et al. (1996) for Europe (a) and of Spudich et al. (1999) for extensional zones (b).

tat es realitzaran utilitzant aquests dos models ens mourem en un rang de resultats que donaran valors de PGA més grans quan s'utilitzi Amb96, resultat més conservatiu, i més petits quan s'utilitzi Spu99, resultat menys conservatiu.

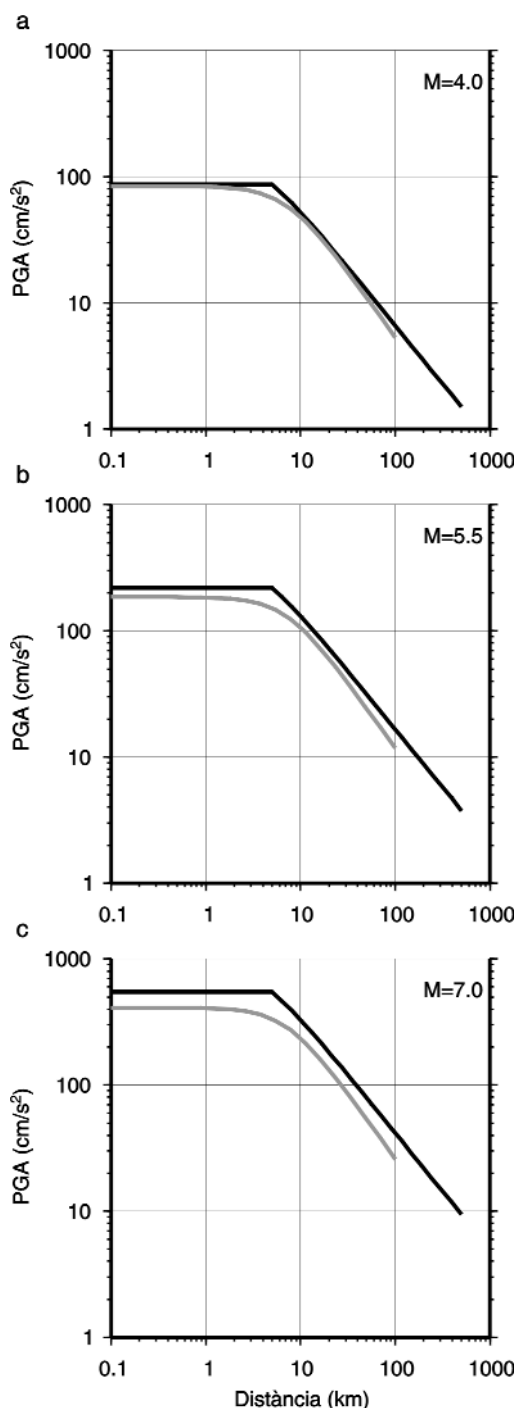


Figura 4.29. Comparació entre els models d'atenuació d'Ambraseys et al. (1996; en gris fosc) i els de Spudich et al. (1999; en gris clar) per tres magnituds diferents: 4.0 (a), 5.5 (b) i 7.0 (c).

Comparison between the attenuation models from Ambraseys et al. (1996; in dark gray) and from Spudich et al. (1999; in light gray) for three different magnitudes: 4.0 (a), 5.5 (b) i 7.0 (c).

4.4. Anàlisi probabilista de perillositat sísmica: Model Poissonià

En aquest apartat es realitzarà una anàlisi de la perillositat sísmica assumint un comportament poissonià de la recurrència de terratrèmols, on no s'inclouran les falles actives com a fonts sismogèniques. A continuació es descriuen els diferents models utilitzats per al càlcul, es comenten els resultats obtinguts per a cada model i al final es fa una discussió a partir de la comparació entre els diferents models utilitzats.

4.4.1. Models de càlcul

L'anàlisi probabilista de la perillositat sísmica assumint un comportament poissonià de l'ocurrència dels terratrèmols s'ha realitzat per dos models que es diferencien només en el model d'atenuació utilitzat:

1. Model 1: els càlculs s'han realitzat utilitzant el model d'atenuació Amb96 (Ambraseys et al., 1996).
2. Model 2: els càlculs s'han realitzat utilitzant el model d'atenuació Spu99 (Spudich et al., 1999).

Per al càlcul de la perillositat s'ha seguit el procediment estàndard aplicat en aquesta classe d'estudis, fet que permetrà comparar els resultats aquí obtinguts amb els obtinguts a altres estudis realitzats a la mateixa zona o dins del mateix context regional. Aquest càlcul s'ha realitzat per diferents períodes de recurrència (475, 1000, 5000, 10000 i 25000 anys) utilitzant el programa informàtic CRISIS99 (versió 1.01) desenvolupat a l'Institut de Ingenieria de la UNAM (Mèxic) per Mario Ordaz, Armando Aguilar i Jorge Arboleda.

4.4.2. Resultats

Per a cada un dels models de càlcul s'han obtingut mapes de perillositat per als diferents períodes de recurrència i corbes de perillositat on es dona la probabilitat d'excedència anual per diferents graus d'acceleració pic (PGA) per les principals ciutats de la zona estudiada (Girona, Barcelona, Tarragona, Castelló i València).

Les figures 4.30 i 4.31 mostren els mapes de la distribució de l'acceleració pic (PGA) per al 10% d'excedència en 50, 105, 525, 1050 i 2630 anys pels models 1 i 2 respectivament. En ambdós casos els mapes mostren dues regions on els valors del PGA són clarament superiors a la resta. Una d'aquestes dues regions correspon a la font areal 10 (Bètiques), mentre que l'altra està localitzada entre les fonts 2 i 4 (serrer Transversals i Cadenes Costaneres Catalanes septentrionals; figura

4.26), amb el valor del PGA a la primera clarament superior als de la segona per tots els períodes de temps considerats. Al model 1 el valor màxim del PGA (en cm/s^2) a la font 10 pels diferents períodes de temps és de 78.35, 106.76, 185.11, 231.98 i 297.81 i a la regió entre les fonts 2 i 4 és de 61.47, 83.22, 156.91, 199.51 i 268.62. Al model 2 el valor màxim del PGA (en cm/s^2) a la font 10 és de 57.82, 76.34, 134.55, 156.00 i 192.09 i a la regió entre les fonts 2 i 4 és de 43.81, 62.04, 107.39, 134.75 i 171.61 pels diferents períodes de temps considerats. Entre ambdues regions hi ha una gran àrea, corresponent principalment a la font areal 1 (Cadenes Costaneres Catalanes centrals i meridionals), on es localitzen els valors de PGA més baixos. Com es pot veure la distribució geogràfica dels valors de PGA està clarament controlada per distribució les fonts areals i, per tant, posa de manifest la importància de realitzar una bona definició d'aquestes.

Les corbes de perillositat per les ciutats de Girona, Barcelona, Tarragona, Castelló i València (figura 4.32) mostren per ambdós models que, en general, per a una mateixa probabilitat d'excedència a la ciutat de Girona és on s'obté el valor de PGA més alt, mentre que a Tarragona s'obté el més petit. De totes formes, també es pot veure que per a probabilitats d'excedència anual entre 0.1 i 0.01 és a València on el valors de PGA són més alts, tot i que és en aquest rang on les diferències de PGA entre les diferents ciutat són més petites.

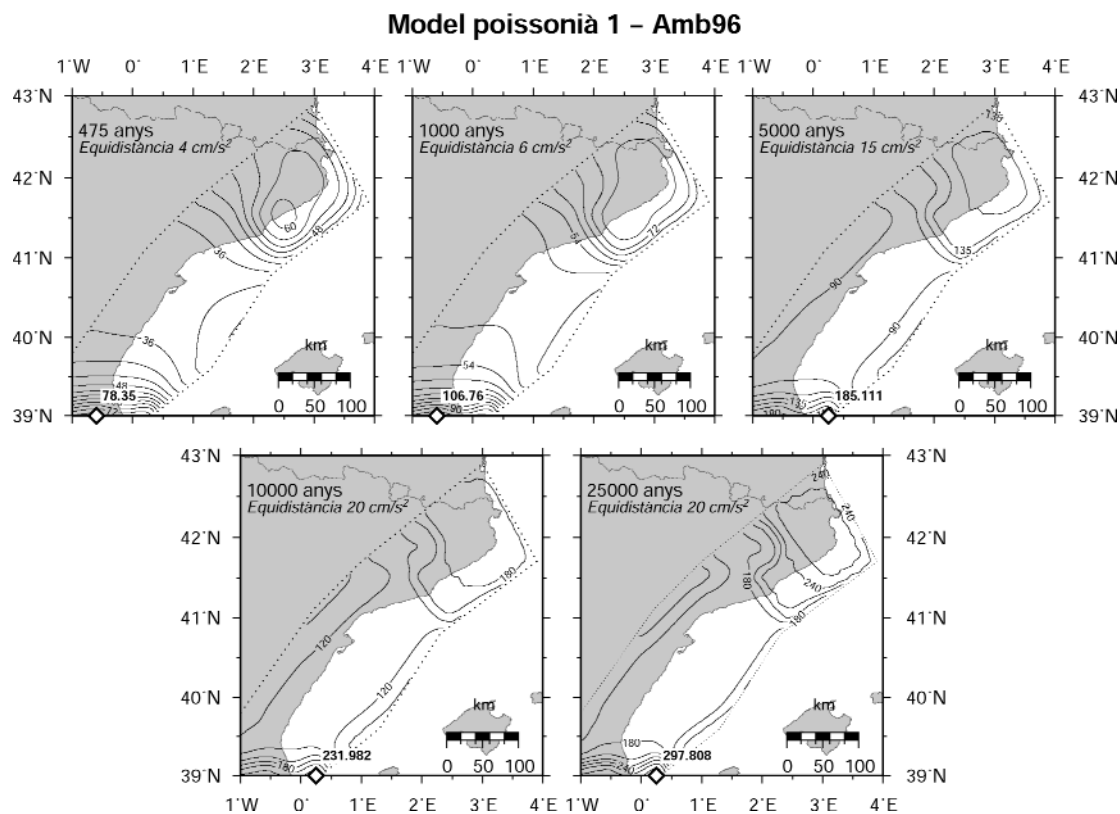


Figura 4.30. Mapes de PGA (cm/s^2) per un 10% de probabilitat d'excedència en 50, 105, 526, 1053 i 2634 anys (que equival a períodes de retorn de 475, 1000, 5000, 10000 i 25000 anys respectivament) corresponents al model 1. A cada mapa s'indica l'equidistància de les corbes. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

PGA (cm/s^2) maps for 10% of probability of exceedance in 50, 105, 526, 1053 and 2634 years (equivalent to return periods of 475, 1000, 5000, 10000 and 25000 years respectively) corresponding to model 1. The contour interval is indicated in each map. The white line with black dots bounds the study zone.

4.4.3. Comparació i discussió

La comparació entre els models 1 i 2 mostra que els valors de PGA obtinguts pels diferents períodes de temps analitzats utilitzant els models d'atenuació d'Amb96 sempre són, aproximadament, un 15% superiors als que s'obtenen quan es fa servir el model de Spu99 (figura 4.33). Si l'anàlisi de les diferències que hi ha entre els diferents models es fa per cada una de les ciutats per les quals s'han obtingut les corbes de probabilitat d'excedència anual del PGA (figura 4.34) s'observa que, per una mateixa probabilitat, els valors de PGA obtinguts sempre són més alts pel model 1 que pel 2, és a dir, més alts quan s'utilitza Amb96. A partir d'aquests resultats, es podria dir que la diferència entre els models constitueix la incertesa que aniria relacionada amb aquest estudi, on els resultats obtinguts mitjançant el model 1 es podrien prendre com els més conservatius, ja que corresponen als valors de PGA més alts, mentre que els obtinguts a partir del model 2 serien els menys conservatius, ja que corresponen als valors de PGA més baixos.

A part de comparar els resultats obtinguts d'ambdós models entre si, també s'han comparat amb els resultats obtinguts en d'altres estudis realitzats a la zona (Roca i Udias, 1976; Litehiser i Marrone, 1991; Ojeda et al., 2002; Peláez i López Casado, 2002; Secanell et al., 2004) i amb els

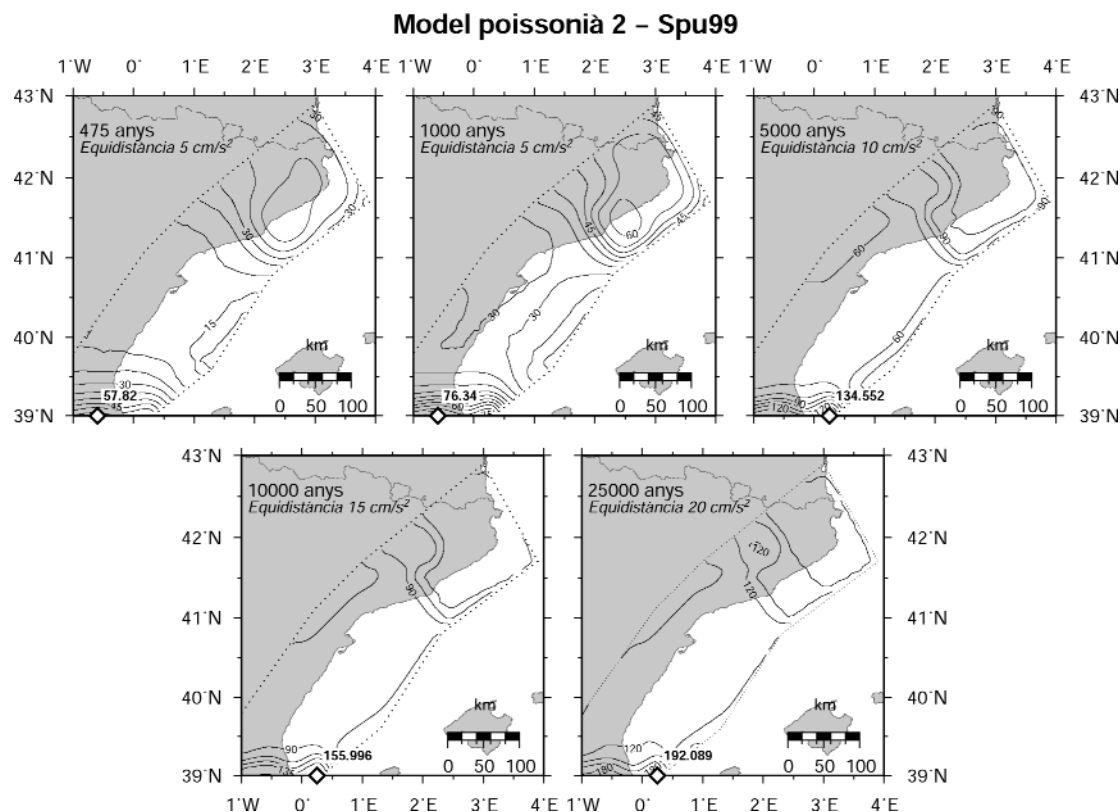


Figure 4.31. Mapes de PGA (cm/s^2) per un 10% de probabilitat d'excedència en 50, 105, 526, 1053 i 2634 anys (que equival a períodes de retorn de 475, 1000, 5000, 10000 i 25000 anys respectivament) corresponents al model 2. A cada mapa s'indica l'equidistància de les corbes. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

PGA (cm/s^2) maps for 10% of probability of exceedance in 50, 105, 526, 1053 and 2634 years (equivalent to return periods of 475, 1000, 5000, 10000 and 25000 years respectively) corresponding to model 2. The contour interval is indicated in each map.

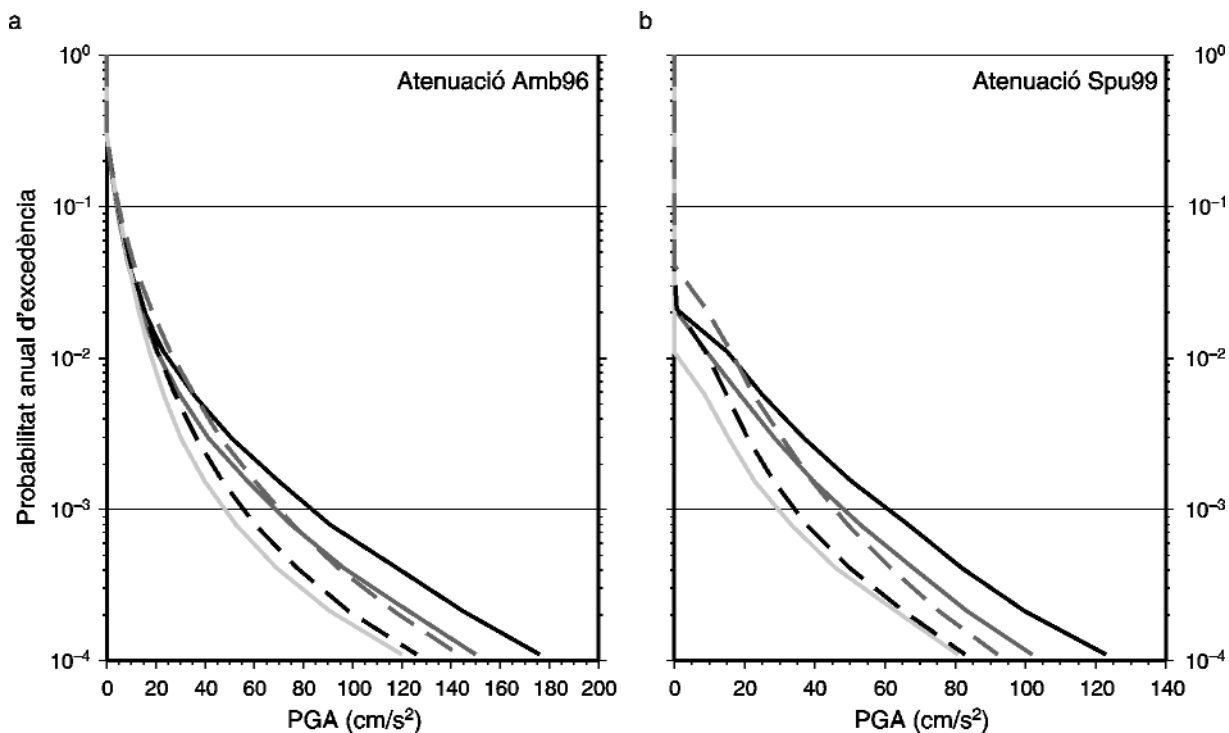


Figura 4.32. Corbes de perillositat obtingudes per les ciutats de Girona (corba negra), Barcelona (corba gris fosc), Tarragona (corba gris clar), Castelló (corba negra discontinua) i València (corba gris fosc discontinua) pel model 1 (a) i pel model 2 (b).

Hazard curves obtained for the cities of Girona (black curve), Barcelona (dark gray curve), Tarragona (light gray curve), Castelló (dashed black curve) and València (dashed dark gray curve) for model 1 (a) and model 2 (b).

valors de perillositat donats a la norma de construcció sísmoresistent espanyola (NCSR-02, 2002). Si es compara quina és la localització de les zones on els valors de perillositat són màxims, en general, tots els treballs assenyalen els Pirineus i les Bètiques i, entre les dues, és on es localitzen les zones amb valors més baixos (zona de Castelló i delta de l'Ebre). D'altra banda, si es compara el rang de valors de PGA obtinguts a l'estudi es veu que els valors obtinguts amb el model Amb96 estan dins del rang de valors donats en la resta de treballs, mentre que els valors obtinguts amb Spu99 sempre estan lleugerament per sota. Aquesta comparació dóna validesa a l'estudi probabilista de perillositat sísmica realitzat pel marge nord-occidental del solc de València i, a més, fa pensar que el rang de valors obtinguts amb el model Amb96 s'apropa més a la realitat de la zona. És per aquest últim fet que a l'estudi de perillositat sísmica tenint en compte les falles actives només s'utilitzarà el model Amb96.

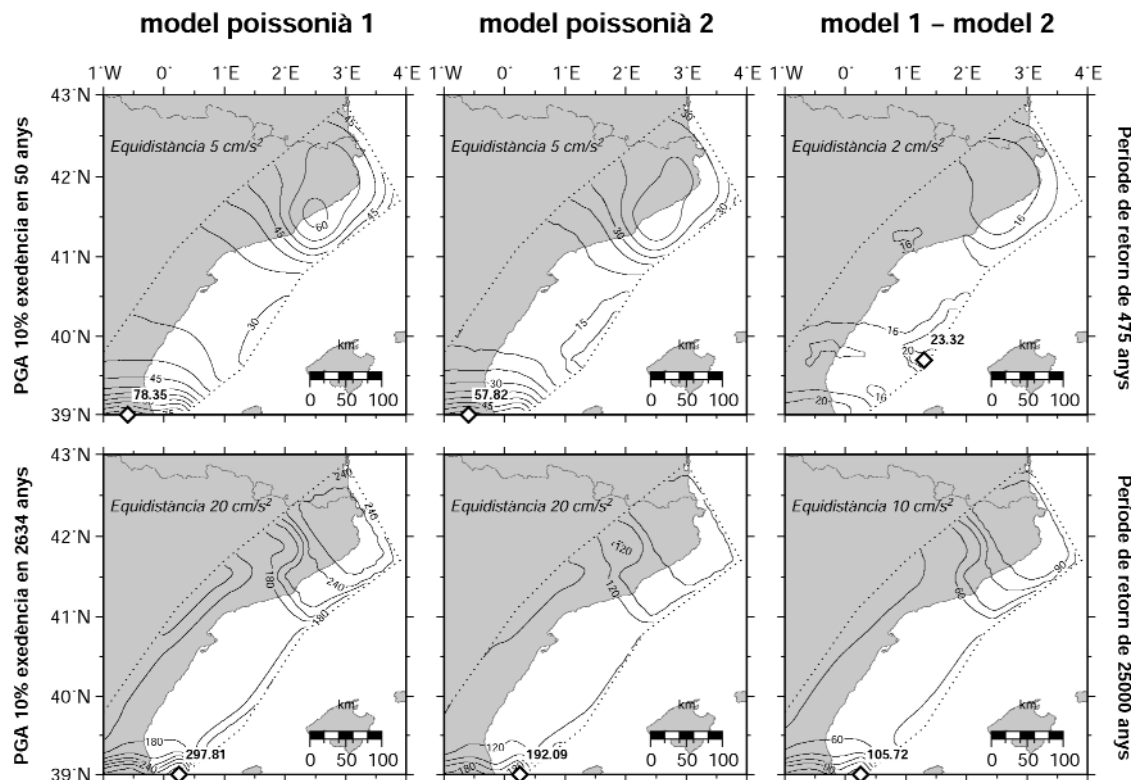


Figura 4.33. Mapes de PGA (cm/s^2) per un 10% de probabilitat d'excedència en 50 (fila superior) i 2634 (fila inferior) anys (que equival a períodes de retorn de 475 i 25000 anys respectivament) corresponents als models poissonians 1 i 2 i a la diferència de restar el model 2 del 1. Els mapes corresponents a la diferència entre els models mostren les variacions dels valors de PGA que es produeixen quan es tenen en compte els diferents models d'atenuació. Els diamants blancs mostren la localització i el valor de PGA més alt. A cada mapa s'indica l'equidistància de les corbes. Observi's la diferència d'equidistància de corbes entre els mapes corresponents als models i el corresponent a la diferència. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

PGA (cm/s^2) maps for 10% of probability of exceedance in 50 (upper row) and 2634 (lower row) years (equivalent to return periods of 475 and 25000 years respectively) corresponding to poissonian models 1 and 2 and to the difference produced when model 2 is subtracted from model 1. The maps corresponding to the difference between both models shows the variations in PGA values produced when different attenuation models are used. White diamonds indicates the location of the highest PGA and the corresponding number indicates its value. The contour interval is indicated in each map. Note the different contour interval between the maps corresponding to the models and the map corresponding to the difference. The white line with black dots bounds the study zone.

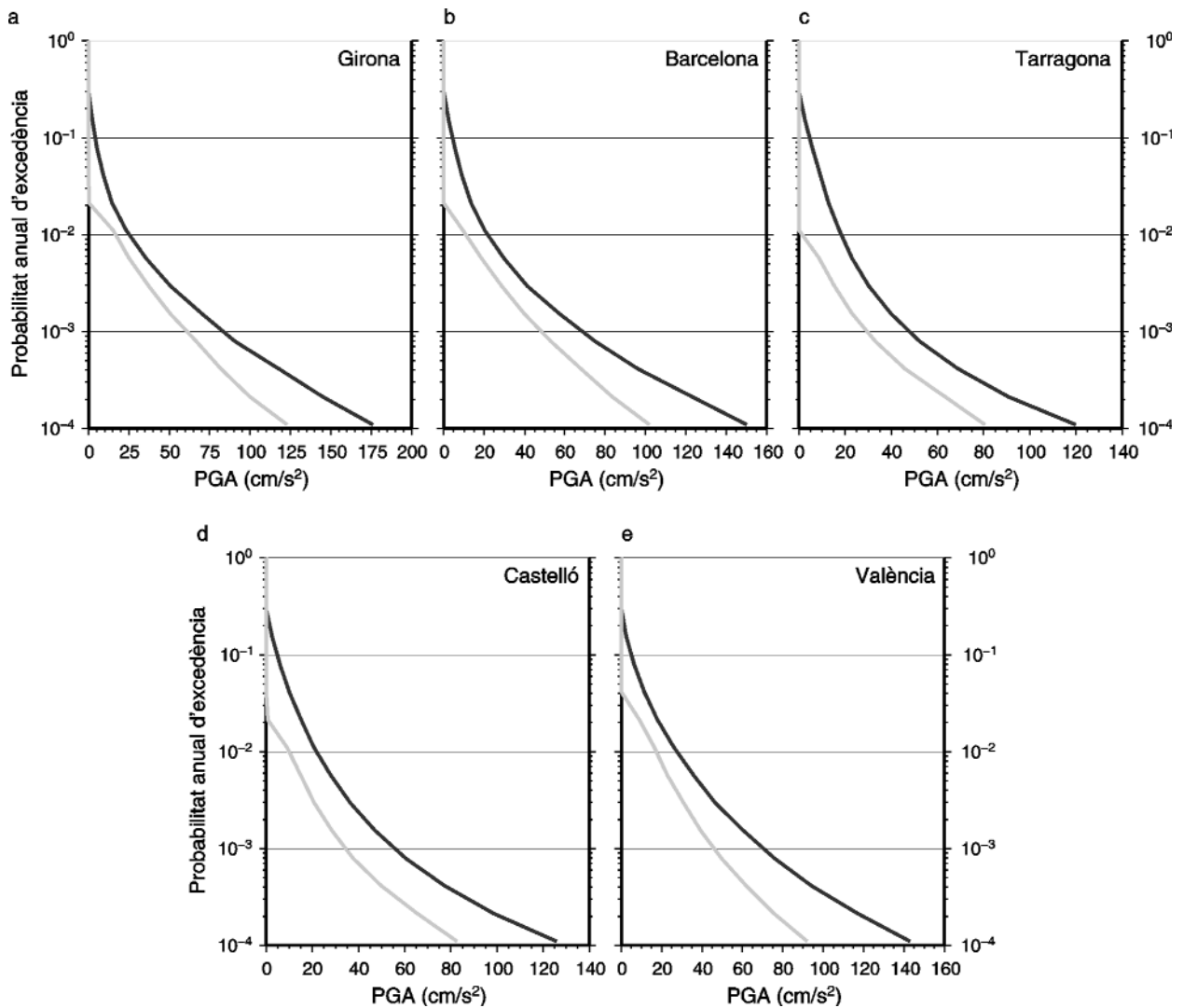


Figura 4.34. Corbes de perillositat per les ciutats de Girona (a), Barcelona (b), Tarragona (c), Castelló (d) i València (e) on es comparen els resultats obtinguts pel model 1 (línia gris fosc) i pel model 2 (línia gris clar). Es pot observar que els valors de PGA pel model 2 sempre són inferiors per una mateixa probabilitat d'excedència anual.

Individual hazard curves for the cities of Girona (a), Barcelona (b), Tarragona (c), Castelló (d) and València (e) where results obtained for model 1 (dark gray line) and for model 2 (light gray line) are compared. Notice that the PGA values for model 2 are always lower for the same annual probability of exceedance.

4.5. Anàlisi probabilístic de perillositat sísmica: Model característic

Els estudis paleosismològics permeten localitzar les falles sismogèniques i caracteritzar els grans terratrèmols que aquestes poden generar, la seva magnitud, el temps que passa entre grans terratrèmols i el temps transcorregut des de l'últim. Aquesta nova informació ha afavorit el desenvolupament de nous mètodes de càlcul de la perillositat sísmica que assumeixen el model de terratrèmol característic en l'ocurrència de terratrèmols (Schwartz i Coppersmith, 1984; Youngs i Coppersmith, 1985). Aquests models incorporen el temps transcorregut des de l'últim terratrèmol tenint en compte que el procés d'acumulació i alliberament de l'esforç a les falles és cíclic (McGuire, 1993). Per tant, l'interval de recurrència dels terratrèmols i el temps transcorregut des de l'últim terratrèmol es poden usar per calcular la probabilitat condicional de l'ocurrència d'un futur terratrèmol en una de les fonts donades. De totes formes, com s'ha vist al capítol 3, en zones caracteritzades per una sismicitat baixa els estudis paleosismològics són escassos i, per tant, l'obtenció, quan es pot, dels paràmetres sísmics de les falles es fa de forma indirecte. Es per aquest fet que en aquest apartat es realitzarà un estudi de la perillositat sísmica introduint les falles actives descrites al capítol 3 com a fonts sismogèniques tenint en compte la variabilitat dels paràmetres sísmics determinats per cada una d'elles (taula 3.20), d'aquesta forma es podrà veure quina és la influència de cada un d'ells en el resultat final.

Per tal d'avaluar la influència dels diferents paràmetres sísmics als resultats finals de la perillositat sísmica s'ha tingut en compte el valor màxim i el mínim de cada paràmetre. En el cas de la magnitud màxima s'han considerat dues possibilitats diferents tenint en compte la geometria de les falles. A la primera, s'assumeix que els terratrèmols es produeixen per la ruptura de la falla en tota la seva extensió, mentre, que a la segona, s'ha considerat que la falla estaria constituïda per diferents segments on cada segment es trencaria de forma independent de la resta. En aquest últim cas s'han ignorat les possibles interaccions entre els segments d'una falla. D'aquesta forma la màxima longitud d'una falla donarà la magnitud màxima del terratrèmol relacionat amb ella, mentre que la magnitud mínima vindrà definida per la longitud dels diferents segments en els quals la falla s'ha dividit. A les falles on no s'han distingit segments al càlcul només es fa servir una magnitud màxima. Pel que fa a l'interval de recurrència els valors mínim i màxim que s'utilitzaran són els obtinguts en el capítol 3 (taula 3.20). El problema es planteja amb el temps transcorregut des de l'últim terratrèmol (T_{ut}). Com ja s'ha dit al capítol 3, per determinar aquest paràmetre és imprescindible la realització d'estudis de paleosismologia. Donat que això només ha estat possible per a la falla del Camp, per a la resta de les falles s'ha utilitzat el T_{ut} corresponent al 10%, al 50% i al 90% de l'interval de recurrència. Els paràmetres usats per caracteritzar a les diferents falles i segments es troben resumits a la taula 3.20.

4.5.1. Models de càlcul

Per avaluar la influència dels diferents paràmetres sísmics en la perillositat sísmica s’ha utilitzat una aproximació d’arbre lògic. S’han realitzat dotze models diferents (figura 4.35) per calcular la perillositat sísmica al marge nord-occidental del solc de València per diferents períodes de retorn (475, 1000, 5000, 10000 i 25000 anys). Els models combinen les fonts àrea que assumeixen un comportament poissonià dels terratrèmols amb fonts lineals que corresponen a les falles actives per les quals s’assumeix un comportament de terratrèmol característic. La consideració de les àrees fonts amb comportament poissonià com a sismicitat de fons permetrà veure quina és la influència de la inclusió de les falles a l’anàlisi. Els dotze models a partir dels quals es realitzaran els càlculs de perillositat sísmica es poden agrupar en quatre categories. Cada grup presenta la mateixa segmentació o longitud de la falla, que és el que controla la màxima magnitud del terratrèmol, i el mateix període de recurrència, mentre que el que va variant és el T_{ut} . Aquesta combinació de models permetrà comparar la variació que es produeix en la perillositat usant els valors màxim i mínim de cada paràmetre. A més, aquesta comparació també ressaltarà la importància relativa del paràmetres entre si. Als càlculs s’ha utilitzat només el model d’atenuació Amb96, per les raons comentades a l’apartat anterior. A l’annex 4 hi ha els mapes corresponents a cada un d’aquests dotze models.

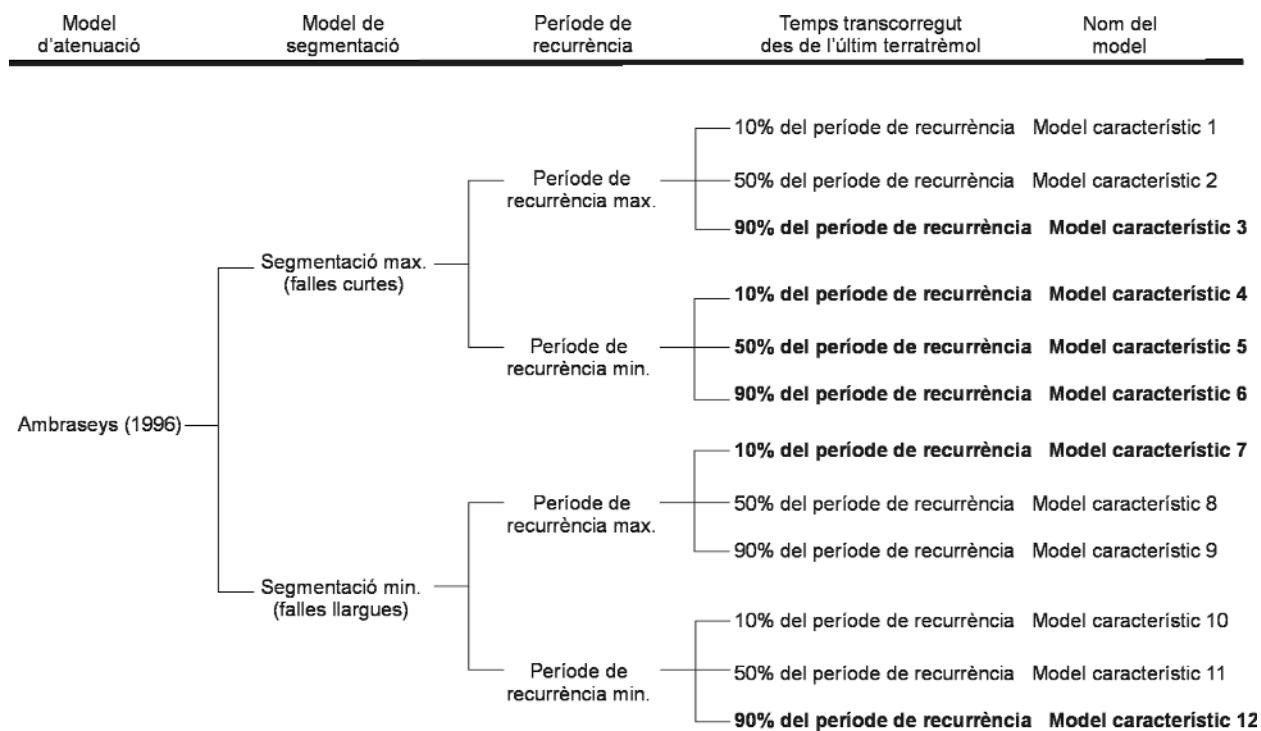


Figura 3.35. Diagrama en arbre lògic que mostra les característiques de cada un dels models utilitzats per determinar la influència dels diferents paràmetres sísmics obtinguts a partir de l’estudi geològic en els resultats de la perillositat sísmica. Els models utilitzats a les comparacions estan escrits en negreta.

Tree logic diagram that shows the characteristics of each model used to determine the influence of different seismic parameters obtained from the geological study in the seismic hazard computations. The models used in different comparisons are written in bold.

4.5.2. Resultats

Els resultats mostren que els valors màxims de perillositat se segueixen localitzant a les mateixes zones que en els models en que s'utilitzaven fonts areals: al nord-est i sud-oest del solc de València. De totes formes, en els resultats obtinguts per als models característics apareix, ja per un període de retorn de 475 anys, una nova zona on la perillositat augmenta (figura 4.36). Aquesta zona es localitza a les conques del Maestrat, coincidint amb una zona on hi ha una important concentració de falles actives (figura 3.109) i allargant-se cap al nord per als períodes de retorn més llargs. Per als períodes de retorn curts els valors màxims de PGA a aquesta nova zona solen ser inferiors als obtinguts a la zona de les Bètiques o de les serres Transversals i nord de les Cadenes Costaneres Catalanes, tot i així, en alguns models pel període de retorn més curt el valor màxim de PGA per a tota l'àrea d'estudi ja es localitza a la zona del Maestrat (models característics 4, 5 i 6 a l'annex 4, veure característiques a la figura 4.35). A mida que els períodes de retorn es van fent més llargs aquesta nova zona va agafant més protagonisme fins, en alguns casos, arribar a doblar els valors de PGA de les altres dues quan es considera el període de retorn més llarg. Una altra característica que es pot observar per als períodes de retorn llargs, sobretot

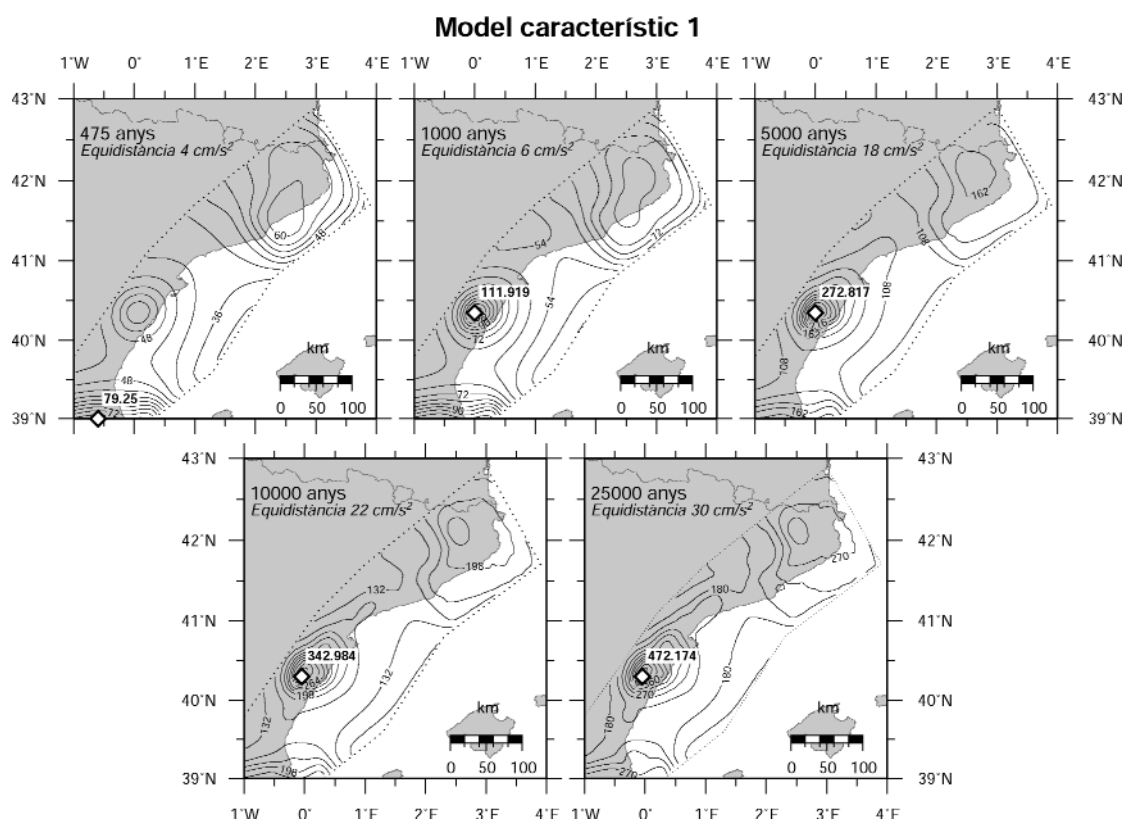


Figura 4.36. Mapes de PGA (cm/s^2) per un 10% de probabilitat d'excedència en 50, 105, 526, 1053 i 2634 anys (que equival a períodes de retorn de 475, 1000, 5000, 10000 i 25000 anys respectivament) corresponents al model característic 1. A cada mapa s'indica l'equidistància de les corbes. A l'annex 4 hi ha tots els mapes obtinguts per als diferents models característics utilitzats (figura 3.35). La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

PGA (cm/s^2) maps for 10% of probability of exceedance in 50, 105, 526, 1053 and 2634 years (equivalent to return periods of 475, 1000, 5000, 10000 and 25000 years respectively) corresponding to "model característic 1". The contour interval is indicated in each map. In annex 4 there are all the maps obtained for the different characteristic models used (figura 3.35). The white line with black dots bounds the study zone.

pel de 25000 anys, és que les corbes de perillositat s'allarguen de forma significativa cap al nord i al sud, seguint l'estructura de les Cadenes Costaneres Catalanes i de les conques del Maestrat. També en algunes zones, i depenent de l'equidistància entre corbes, es poden veure els augments dels valors de perillositat produïts per algunes falles en concret. Aquest fet es pot observar a la figura 4.36 per les falles del Camp i de la Vall d'Uixó (veure figura 3.109 per localitzar les falles) on per períodes de retorn de 10000 i 25000, respectivament, es pot distingir clarament la zona on es localitzen aquestes falles.

En general les corbes de perillositat obtingudes per les ciutats de Girona, Barcelona, Tarragona, Castelló i València a partir dels models característics (figura 4.37 i annex 4) mostren que pels mateixos valors de probabilitat anual d'excedència és a la ciutat de Girona on els valors de PGA tornen a ser màxims, mentre que els mínims corresponen de nou a la ciutat de Tarragona, tot i que per probabilitats molt baixes aquest mínim correspon a la ciutat de Castelló. Pels models característics 4, 5 i 6 (figures a l'annex 4, veure característiques a la figura 4.35) la corba de perillositat per la ciutat de Tarragona mostra algunes diferències respecte als altres models. Per probabilitats d'excedència anuals superiors a 0.001 el comportament és igual al de la resta de models, però per probabilitats inferiors el valor de PGA és cada cop més alt fins arribar a ser una de les ciutats on es poden obtenir els valors PGA més elevats per probabilitats properes a 0.0001, tant sols superats pels de Girona.

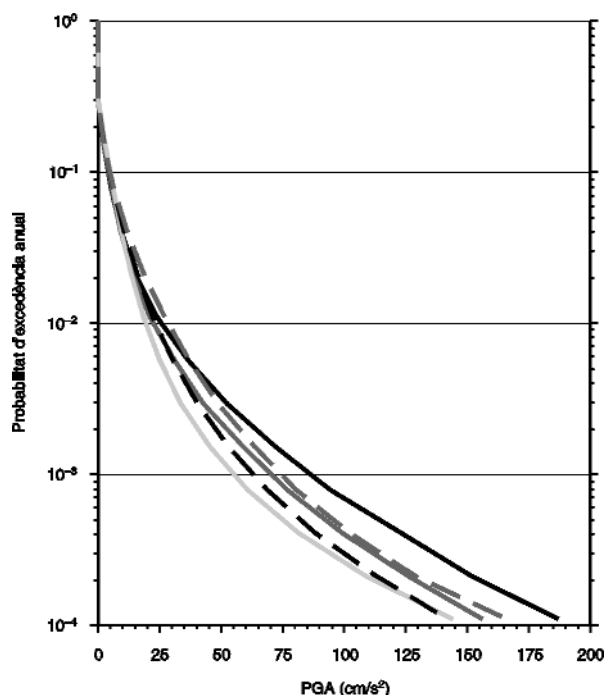


Figura 4.37. Corbes de perillositat obtingudes per les ciutats de Girona (negra), Barcelona (gris), Tarragona (gris clar), Castelló (negre discontinua) i València (gris discontinua) pel model característic 1.

Hazard curves obtained for the cities of Girona (black), Barcelona (gray), Tarragona (light gray), Castelló (dashed black) and València (dashed gray) for "model característic 1".

4.5.3. Comparació dels resultats

Per avaluar la influència que té la introducció de les falles actives als resultats finals dels models de perillositat sísmica i les variacions que es produeixen a causa de la incertesa dels seus paràmetres sísmics s'han comparat els diferents models. En primer lloc, s'ha comparat el resultat obtingut amb el model poissonià 1 (mp1 d'ara en endavant) amb l'obtingut amb els models característics. Després s'ha analitzat l'efecte que els diferents paràmetres sísmics tenen sobre els resultats finals de perillositat: la variació produïda quan s'utilitza el màxim o mínim període de recurrència dels terratrèmols, la donada per una mínima o una màxima segmentació i, finalment, la relacionada amb un màxim o mínim temps transcorregut des de l'últim terratrèmol. Es conclou amb una discussió sobre quin dels tres paràmetres geològics influeix més els resultats finals i, per tant, s'hauria de mirar de determinar amb una major precisió.

Les comparacions s'han realitzat a partir de mapes que mostren les diferències existents entre els diferents models respecte a la distribució del PGA per un 10% de probabilitat d'excedència en 50 i en 2634 anys (períodes de retorn de 475 i 25000 anys) i a partir de gràfiques de probabilitat anual d'excedència respecte a PGA per a tres localitats (figura 4.38): a) la localitat **a** (2.50°E - 42.20°N) està situada en una zona amb una alta perillositat sísmica als models poissonians i amb falles actives en zones pròximes; b) la localitat **b** (0.00° - 40.30°N) està en una zona de baixa perillositat sísmica als models poissonians, però amb algunes falles actives al voltant; i c) la localitat **c** (0.50°W - 39.10°N) està situada a una zona amb una alta perillositat als models poissonians però sense que s'hagi localitzat cap falla activa al seu voltant.

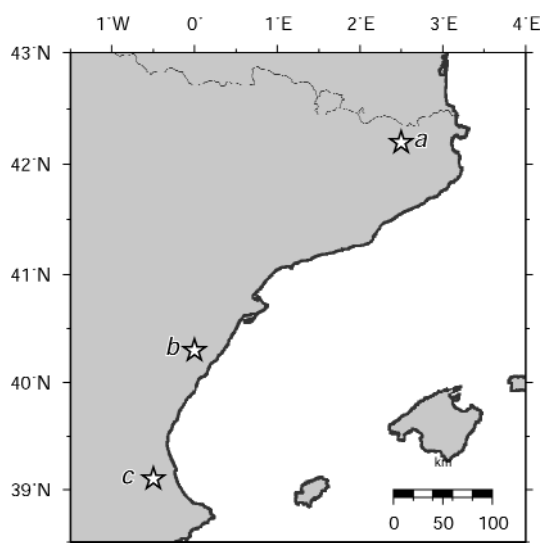
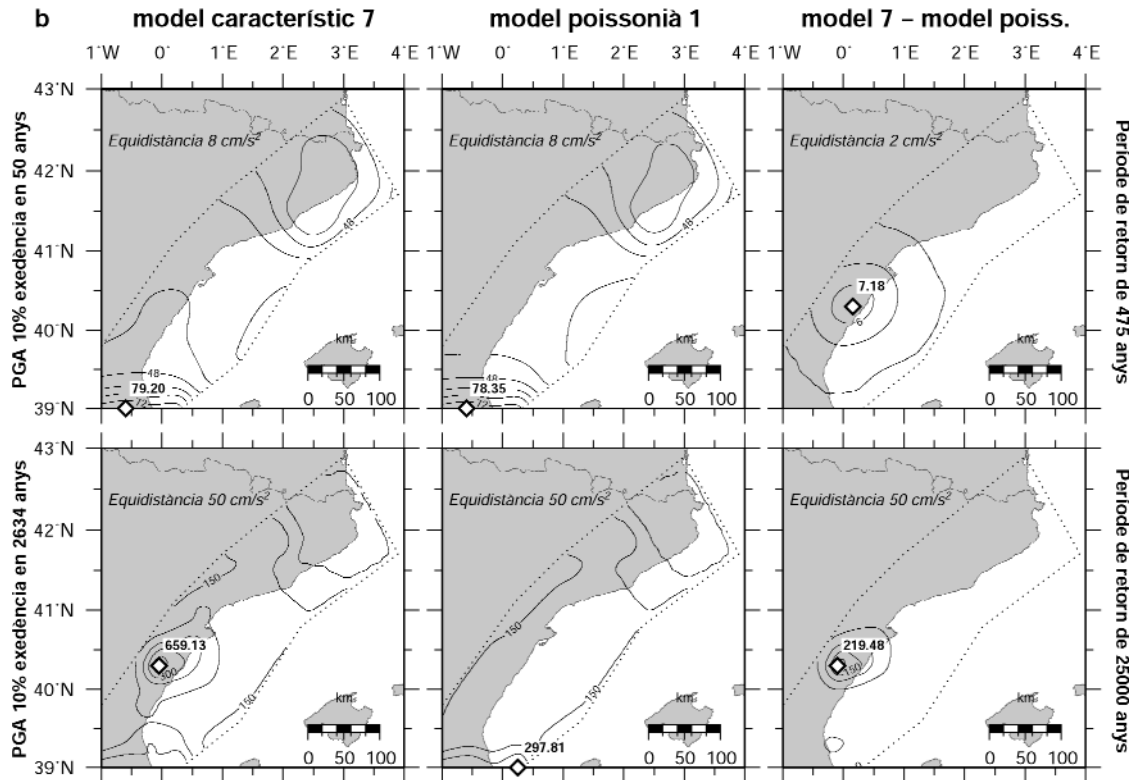
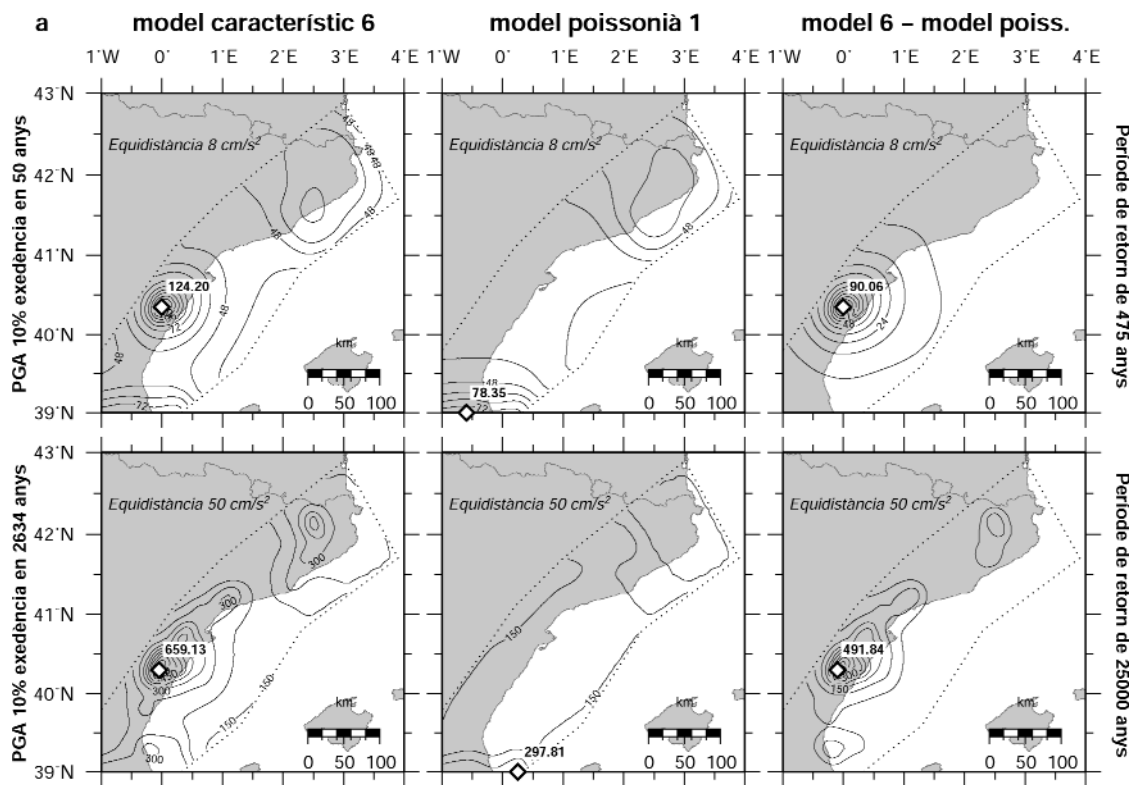


Figura 4.38. Mapa on es mostra la situació de les localitats **a**, **b** i **c** a les quals es realitzen comparatives entre els diferents models.

*Map that shows the location of sites **a**, **b** and **c** where the comparison between models have been done.*



4.5.3.1. Influència de la introducció de les dades geològiques

La influència de les dades geològiques en els resultats de perillositat sísmica s'ha analitzat comparant el model mp1 (model poissonià) i els models característics corresponents a les solucions que donen els valors de PGA més alts (model característic 6) i més baixos (model característic 7).

El model característic 6 és el model que dona els valors de PGA més alts per tota la zona estudiada (annex 4, veure les característiques del model a la figura 4.35). La figura 4.39a mostra la comparació entre aquest model i el model mp1. Els mapes de la tercera columna mostren la diferència de PGA que hi ha quan es resta mp1 del model 6 per períodes de retorn de 475 i 25000 anys. La introducció de les falles produeix un augment dels valors del PGA a la zona de les conques del Maestrat ja pel període més curt, però és pel període llarg on la contribució individualitzada d'algunes falles es fa visible. La diferència màxima entre ambdós models està compresa entre 90 cm/s^2 pel període de retorn curt, i 492 cm/s^2 pel llarg.

A diferència del model 6, el model característic 7 és el que dona uns valors de PGA més baixos (annex 4, veure les característiques del model a la figura 4.35). Quan es compara aquest model amb el model mp1 (figura 4.39b) s'observa que la distribució geogràfica de la diferència de PGA entre models es localitza a la mateixa zona que en la comparació amb el model 6. De totes formes, en aquest cas la diferència entre els dos models no permet observar la contribució individualitzada d'alguna de les falles i els valors de PGA són més baixos, sent de 7.2 cm/s^2 pel període de retorn de 475 anys i de 219.5 cm/s^2 pel de 25000 anys.

Les gràfiques de probabilitat anual d'excedència per les tres localitats comparades (figura 4.40) mostren que és la localitat **b** la que presenta una diferència més gran entre els tres models, sent la corba corresponent al model característic 6 la que dona uns valors de PGA més alts per a una mateixa probabilitat d'excedència anual, mentre que els valors més baixos sempre són per al model poissonià 1. D'altra banda les corbes corresponents a la localitat **c** mostren la diferència més petita, el que significa que al estar lluny de les zones amb falles aquestes afecten molt poc els valors de perillositat de la zona. A la localitat **a**, una zona que sense falles ja tenia una perillositat alta, la contribució de les falles a la perillositat es notòria, tot i que no es tant important com a la localitat **b**.

Figura 4.39. (Pàg. anterior) Mapes de la comparativa entre el model característic 6 i el model poissonià 1 (a) i entre el model característic 7 i el model poissonià 1 (b). Mapes de PGA (cm/s^2) per un 10% de probabilitat d'excedència en 50 (fila superior) i 2634 (fila inferior) anys (que equival a períodes de retorn de 475 i 25000 anys respectivament) corresponents al models característics, al model poissonià 1 i a la diferència de restar el model poissonià dels característics. Els mapes corresponents a la diferència entre els models mostren les variacions dels valors de PGA que es produeixen quan es tenen en compte les falles i s'assumeix el model de terratrèmol característic. Els diamants blancs mostren la localització i el valor de PGA més alt. A cada mapa s'indica l'equidistància de les corbes. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

(Prev. pag.) Maps of the comparison between model 6 and poissonian model 1 (a) and between model 7 and poissonian model 1 (b). PGA (cm/s^2) maps for 10% of probability of exceedance in 50 (upper row) and 2634 (lower row) years (corresponding to return periods of 475 and 25000 years respectively) corresponding to characteristic models, model poissonian 1 and to the difference produced when poissonian model is subtracted from characteristic models. The maps corresponding to the difference between both models shows the variations in PGA values produced when faults are used and it is assumed they follow the characteristic earthquake model. White diamonds indicates the location of the highest PGA and the corresponding number indicates its value. The contour interval is indicated in each map. The white line with black dots bounds the study zone.

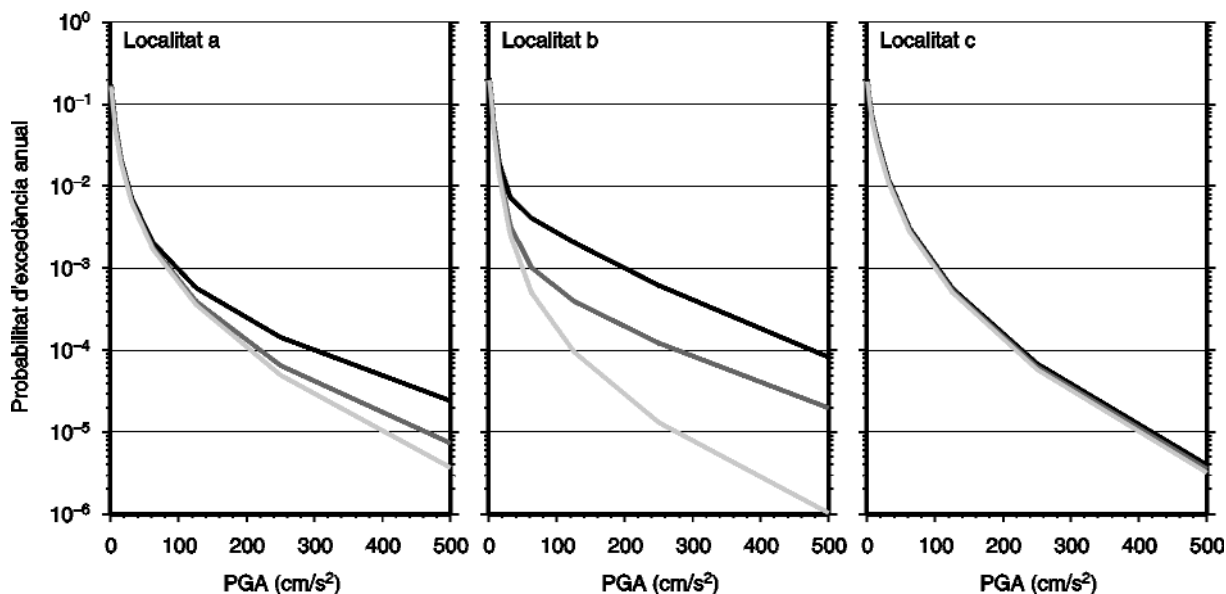


Figura 4.40. Probabilitat d'excedència anual respecte a PGA pel model característic 6 (corbes negres), el model característic 7 (corbes gris fosc) i el model poissonià 1 (corbes gris clar) a les localitats **a**, **b** i **c** (figura 4.38).

*Annual probability of exceedance versus PGA for characteristic model 6 (black curves), characteristic model 7 (dark gray curves) and model poissonian 1 (light gray curves) at sites **a**, **b**, and **c** (figure 4.38).*

4.5.3.2. Influència del període de recurrència

Per determinar quina és la influència que té utilitzar el període de recurrència mínim o màxim en la perillositat, s'han comparat models que presenten la mateixa segmentació i T_{ut} però diferent període de recurrència. La solució que dona una diferència de PGA més gran entre models correspon a la comparació entre els models característics 3 i 6 (veure figura 4.35 per les característiques de cada model). A la figura 4.41 es mostren els mapes de PGA corresponents als models 6 i 3 i a la diferència entre ambdós, per períodes de retorn de 475 i 25000 anys. Els mapes corresponents a la diferència de PGA entre models (mapes de la tercera columna a la figura 4.41) mostren que el model amb un període de recurrència més baix, el 6, és el que dona valors més alts de PGA. A més, al mapa de la diferència pel període de retorn llarg es pot distingir la contribució d'algunes falles de forma individualitzada (la falla d'Amer, la del Montseny i la del Camp; veure la figura 3.109 per la localització de les falles). La diferència màxima de PGA que s'obté d'aquesta comparativa és de 65 cm/s^2 pel període de retorn curt i de 181 cm/s^2 pel llarg.

Les corbes de probabilitat d'excedència anual de PGA pels models característics 3 i 6 a la localitat **a** (figura 4.42, corbes gris clar i negra respectivament) mostren que per una mateixa probabilitat d'excedència anual el valor de PGA que s'obté pel model 6 és més alt, a partir d'una probabilitat d'excedència anual de 0.001. El mateix es veu a la localitat **b**, tot i que aquí les diferències entre models són més altes i l'inici de la divergència entre les corbes es produeix aproximadament a una probabilitat d'excedència anual de 0.01. Les corbes a la localitat **c** no s'han representat, ja que com s'ha vist anteriorment és una localitat on no es nota la influència de les falles i, per tant, tampoc les diferències que s'hi puguin produir a causa de les variacions en el període de recurrència.

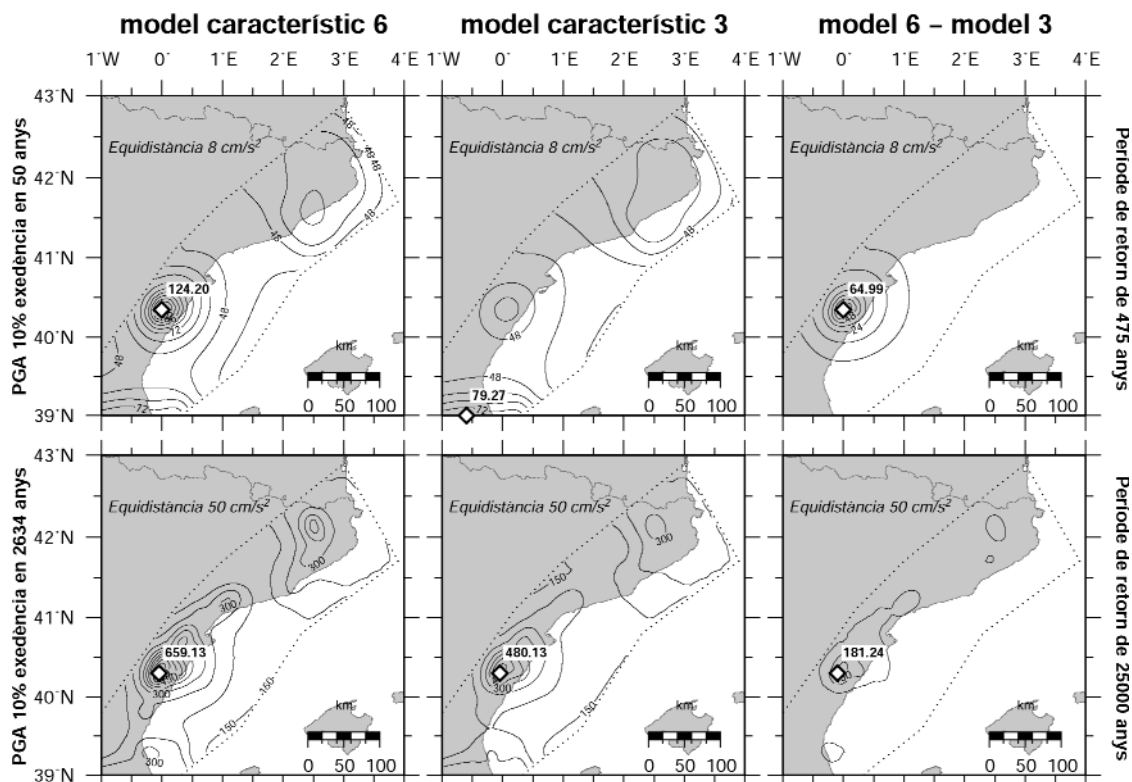


Figura 4.41. Mapes de PGA (cm/s^2) per un 10% de probabilitat d'excedència en 50 (fila superior) i 2634 (fila inferior) anys (que equival a períodes de retorn de 475 i 25000 anys respectivament) corresponents als models característics 6 i 3 i a la diferència de restar el model 3 del 6. Els mapes corresponents a la diferència entre els models mostren les variacions dels valors de PGA que es produeixen quan es tenen en compte el mínim i el màxim valor de l'interval de recurrència. Els diamants blancs mostren la localització i el valor de PGA més alt. A cada mapa s'indica l'equidistància de les corbes. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

PGA (cm/s^2) maps for 10% of probability of exceedance in 50 (upper row) and 2634 (lower row) years (equivalent to return periods of 475 and 25000 years respectively) corresponding to characteristic models 6 and 3 and to the difference produced when model 3 is subtracted from model 6. The maps corresponding to the difference between both models shows the variations in PGA values produced when minimum and maximum recurrence interval are taken into account. White diamonds indicates the location of the highest PGA and the corresponding number indicates its value. The contour interval is indicated in each map. The white line with black dots bounds the study zone.

4.5.3.3. Influència de la segmentació de les falles

Com ja s'ha comentat anteriorment la presència o no de segments a una falla fa variar la magnitud màxima del terratrèmol que s'espera que aquesta falla o els seus segments puguin produir. Com s'ha vist al capítol 3, a la zona d'estudi la segmentació o no de les falles s'ha basat sobretot en criteris geomorfològics. S'ha considerat que les falles a les quals s'han diferenciat dos o més segments també es podrien arribar a trencar en la seva totalitat. Això permet comparar models on les falles no estan segmentades amb models on estan segmentades. Per a evitar que a la comparació hi influeixin altres paràmetres els models que s'han seleccionat tenen el mateix T_{ut} però diferent longitud de segments, el que implica que el període de recurrència també és diferent, ja que la longitud de la falla és un dels paràmetres utilitzats per obtenir aquest període (apartat 3.8 del capítol 3).

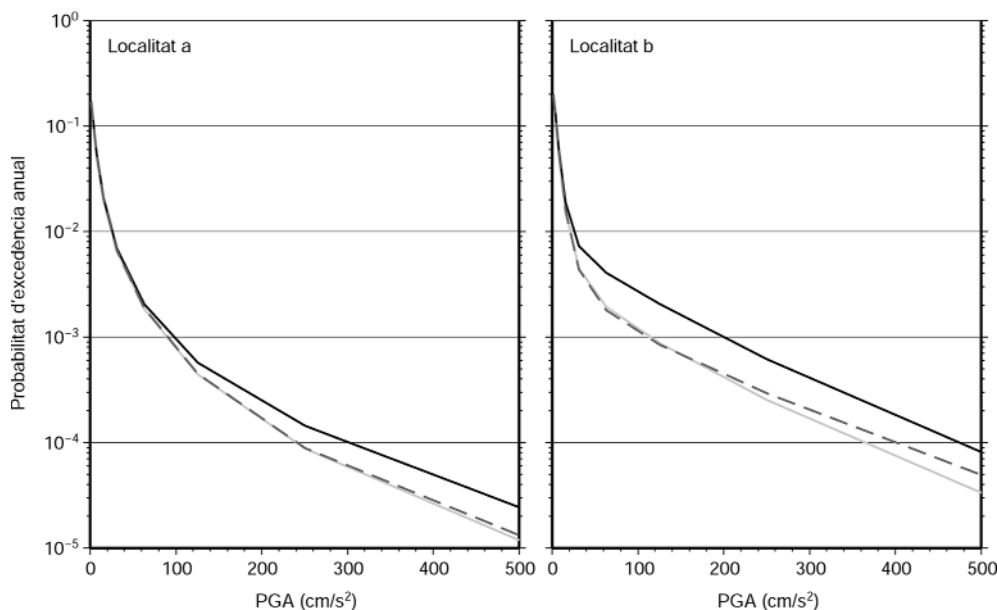


Figura 4.42. Probabilitat d'excedència anual respecte a PGA pels models 3 (corba gris clar), 6 (corba negra) i 12 (corba discontinua gris fosc) a les localitats **a** i **b** (situació al mapa de la figura 4.38).

*Annual probability of exceedance versus PGA for characteristic models 3 (light gray curve), 6 (black curve) and 12 (dashed dark gray curve) at sites **a** and **b** (site situation on figure 4.38).*

Les diferències més grans de PGA s'obtenen quan es comparen els models característics 12 i 6. Els mapes de perillositat resultants d'aquesta comparació mostren que els valors de PGA més alts s'obtenen quan es considera una màxima segmentació de les falles (figura 4.43). Els valors màxims de la diferència de PGA entre els dos models són de 69 cm/s² pel període de retorn de 475 anys i de 126 cm/s² pel de 25000 anys. La diferència màxima entre models es localitza a la zona de les conques del Maestrat i al mapa corresponent al període de retorn de 25000 anys es pot veure que aquestes diferències van també lligades a falles individuals (la falla d'Amer, la del Camp i la del Baix Ebre; veure la figura 3.109 per la localització de les falles).

Les corbes corresponents a la probabilitat anual d'excedència de PGA pels models característics 6 i 12 (figura 4.42) mostren que, tant a la localitat **a** com a la **b**, el model amb una màxima segmentació, el 6 (corba negra), sempre dona valors de PGA superiors al model de mínima segmentació, el 12 (corba discontinua gris fosc). La diferència entre ambdues localitats ve marcada per la probabilitat d'excedència anual a partir de la que s'inicia una divergència entre les corbes, una probabilitat de 0.001 per la localitat **a** i de 0.01 a la localitat **b**. En aquest cas tampoc s'ha realitzat la comparació de models a la localitat **c** per les mateixes raons exposades a l'apartat anterior.

4.5.3.4. Influència del temps transcorregut des de l'últim terratrèmol (T_{ut})

El temps transcorregut des de l'últim terratrèmol (T_{ut}) és un paràmetre que no s'ha pogut determinar de forma independent per cap de les falles de l'àrea d'estudi, amb l'excepció del segment de l'Hospitalet de la falla del Camp, on s'han realitzat estudis de paleosismologia. Per solucionar aquest problema i veure quina importància té aquest paràmetre dins dels estudis de perillositat sísmica que tenen en compte les falles actives, s'ha determinat com a T_{ut} un tant per cent (10%, 50% i 90%) del període de recurrència dels terratrèmols per a cada falla.

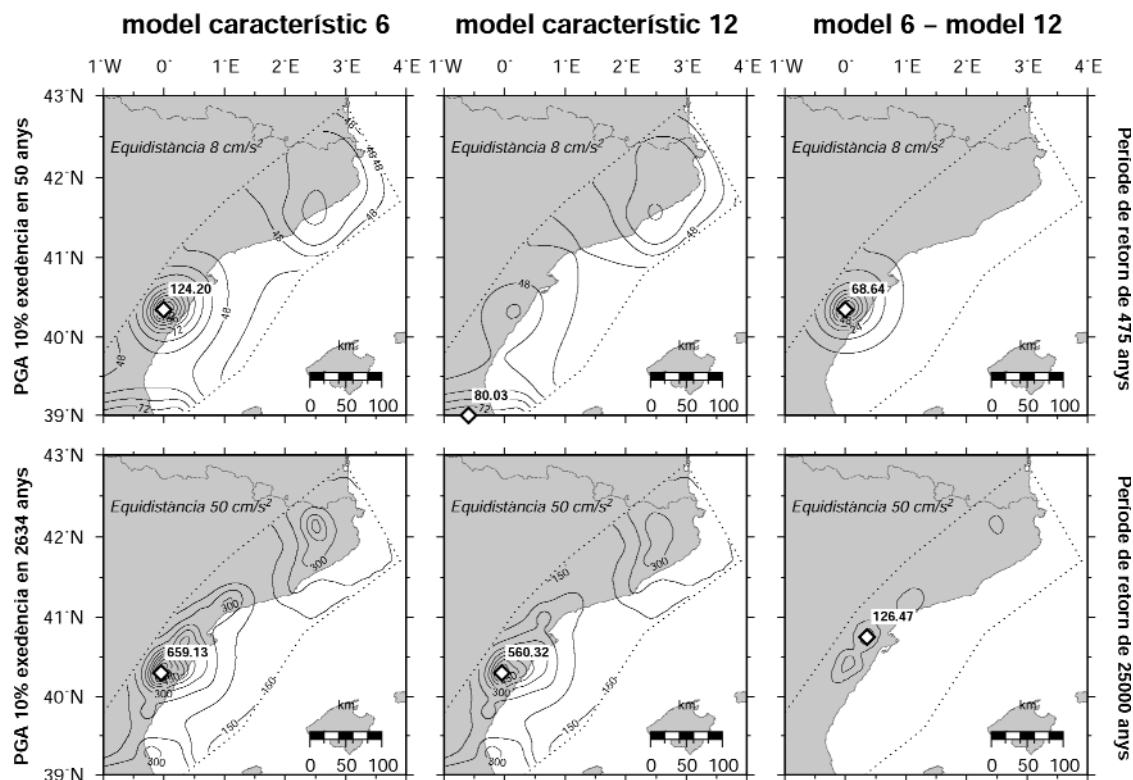


Figura 4.43. Mapes de PGA (cm/s^2) per un 10% de probabilitat d'excedència en 50 (fila superior) i 2634 (fila inferior) anys (que equival a períodes de retorn de 475 i 25000 anys respectivament) corresponents als models característics 6 i 12 i a la diferència de restar el model 12 del 6. Els mapes corresponents a la diferència entre els models mostren les variacions dels valors de PGA que es produeixen quan es tenen en compte una màxima i una mínima segmentació. Els diamants blancs mostren la localització del valor més alt de PGA i el seu valor. A cada mapa s'indica l'equidistància de les corbes. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

PGA (cm/s^2) maps for 10% of probability of exceedance in 50 (upper row) and 2634 (lower row) years (equivalent to return periods of 475 and 25000 years respectively) corresponding to characteristic models 6 and 12 and to the difference produced when model 12 is subtracted from model 6. The maps corresponding to the difference between both models shows the variations in PGA values produced when maximum and minimum segmentation are taken into account. White diamonds indicates the location of the highest PGA and the corresponding number indicates its value. The contour interval is indicated in each map. The white line with black dots bounds the study zone.

Per veure quina és la influència d'aquest paràmetre s'han de comparar dos models que presentin un T_{ut} diferent, per exemple del 10% i del 90% per agafar els valors extrems, però on ambdós tinguin la mateixa segmentació i període de recurrència. La màxima diferència de PGA s'obté quan es comparen els models característics 4 i 6 (consultar les característiques de cada model a la figura 4.35). Els mapes corresponents a la diferència de PGA entre aquests dos models (figura 4.44) mostren que el T_{ut} del 90% produeix els valors més alts de PGA. Tot i que aquests resultats ja eren d'esperar (Ojeda et al., 2002), les diferències entre models produïdes per la variació d'aquest paràmetre són les més petites quan es comparen amb les produïdes pels altres paràmetres. Cal destacar la diferent equidistància entre corbes que s'ha utilitzat als mapes corresponents a la diferència entre models, respecte als mapes corresponents a cada un dels models (figura 4.44), el que indica de forma clara la poca diferència que implica la variació del T_{ut} . Aquesta diferència entre els dos models està compresa entre 2.6 cm/s^2 pel període de recurrència de 475 anys i 14 cm/s^2 pel de 25000 anys.

Les corbes de probabilitat anual d'excedència pels models característics 4, 5 i 6 (consultar les característiques de cada model a la figura 4.35) per la localitat **b** (figura 4.45) mostren que per una mateixa probabilitat d'excedència el valor de PGA més alt s'obté pel model que correspon al 90% del T_{ut} (model 6, corba gris fosc discontinua). De totes formes també es pot observar que la diferència entre els tres models és molt petita.

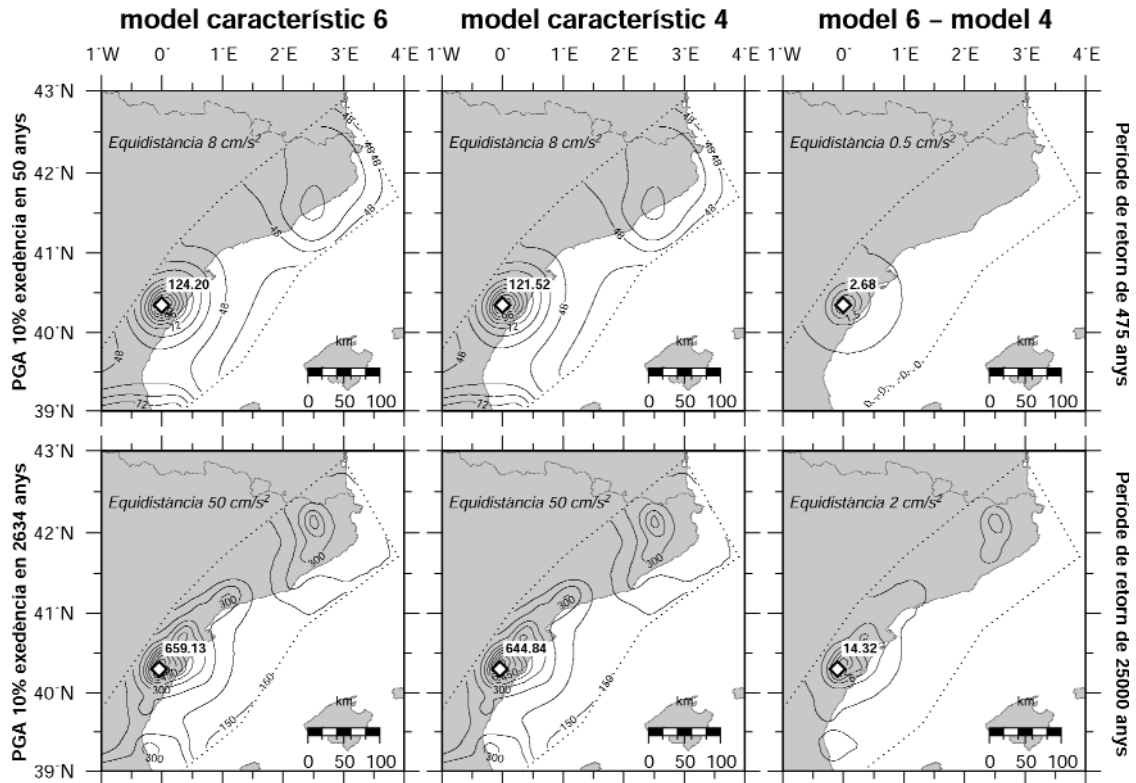


Figura 4.44. Mapes de PGA (cm/s^2) per un 10% de probabilitat d'excedència en 50 (fila superior) i 2634 (fila inferior) anys (que equival a períodes de retorn de 475 i 25000 anys respectivament) corresponents als models característics 6 i 4 i a la diferència de restar el model 4 del 6. Els mapes corresponents a la diferència entre els models mostren les variacions dels valors de PGA que es produeixen quan es tenen en compte el màxim i el mínim temps transcorregut des de l'últim terratrèmol (T_{ut}). Observis la diferència d'equidistància de corbes entre els mapes corresponents als models i el corresponent a la diferència. Els diamants blancs mostren la localització i el valor de PGA més alt. A cada mapa s'indica l'equidistància de les corbes. La línia blanca amb punts negres limita la zona d'estudi.

PGA (cm/s^2) maps for 10% of probability of exceedance in 50 (upper row) and 2634 (lower row) years (equivalent to return periods of 475 and 25000 years respectively) corresponding to characteristic models 6 and 4 and to the difference produced when model 4 is subtracted from model 6. The maps corresponding to the difference between both models shows the variations in PGA values produced when maximum and minimum time elapsed since the last event are taken into account. Note the different contour interval between the maps corresponding to the models and the map corresponding to the difference. White diamonds indicates the location of the highest PGA and the corresponding number indicates its value. The contour interval is indicated in each map. The white line with black dots bounds the study zone.

4.5.3.5. Els paràmetres sísmics que més influeixen en els resultats finals

Com s'ha vist els paràmetres sísmics derivats de la informació geològica que intervenen en l'anàlisi probabilista de perillositat sísmica on s'assumeix el model de terratrèmol característic per les falles actives produeixen variacions en els resultats finals quan s'utilitzen els valors màxims i mínims de cada un d'ells. Els valors més alts de PGA s'obtenen quan la recurrència és mínima, quan les falles presenten una màxima segmentació i quan ha passat el 90% del T_{ut} . Però, quin d'aquests paràmetres produeix les diferències més importants? S'ha vist com la variació del T_{ut} comporta poques diferències de PGA entre els models enfront dels altres dos paràmetres. Per valorar la incidència de la segmentació y el període de recurrència s'han comparat tres models entre si, els quals tenen en comú el T_{ut} , mentre que un dels tres té en comú amb els altres dos una de les característiques a comparar. Per aquesta comparació s'han triat els models característics 3, 6 i 12 i, dels tres, el model 6 és el que s'ha agafat com a referència (consultar les característiques de cada model a la figura 4.35). Els models 6 i 3 presenten una mateixa segmentació però diferent període de recurrència, mentre que el 6 i el 12 presenten una mínima recurrència (tot i que no implica que sigui el mateix període de recurrència) però diferent segmentació. La comparació (figura 4.42) mostra que per la mateixa probabilitat d'excedència anual sempre s'obté el valor màxim de PGA pel model 6, mentre que pel model 3 s'obtenen els valors més baixos, tot i que amb molt poca diferència respecte al model 12. Per tant, aquesta comparació mostra que el paràmetre que presenta una major influència en la variació dels resultats és el període de recurrència i que recurrències curtes produeixen els valors de PGA més alts. A continuació vindrien la segmentació de la falla i per últim el T_{ut} .

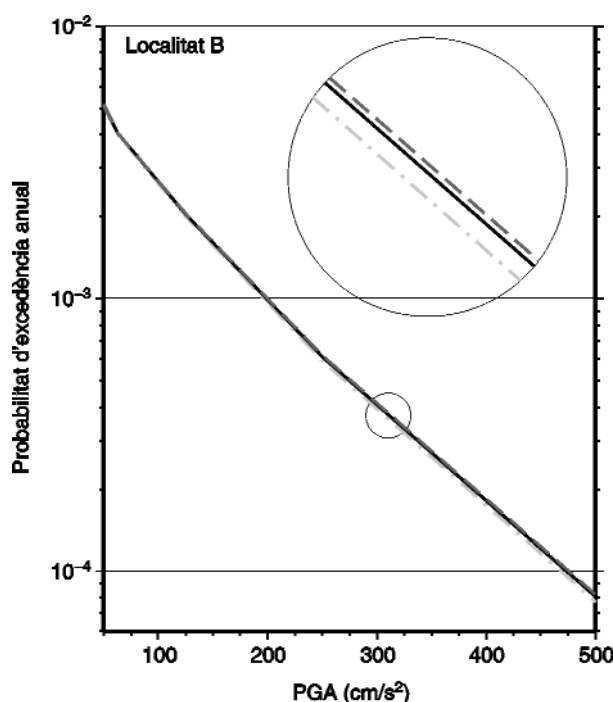


Figura 4.45. Probabilitat anual d'excedència respecte a PGA pels models característics 4 (corba gris clar discontinua), 5 (corba negra) i 6 (corba gris fosc discontinua) a la localitat **b** (situació al mapa de la figura 4.38). El cercle gran és un zoom del petit.

*Annual probability of exceedance versus PGA for characteristic models 4 (light gray dashed line), 5 (black line) and 6 (black dashed line) at site **b** (site situation on figure 4.38). The big circle is a zoom of the small one.*

4.6. Conclusions

L'objectiu bàsic d'aquest capítol era veure com afectava els resultats d'un estudi de perillositat sísmica la introducció de falles actives localitzades en una zona de deformació lenta, el marge nord-occidental del solc de València. Per arribar a assolir aquest objectiu, primer s'ha realitzat un estudi probabilista de perillositat sísmica on s'ha assumit que la recurrència dels terratrèmols seguia un model poissonià. Els resultats obtinguts mostren que les zones amb una perillositat més alta se situen als extrems nord i sud del solc, mentre que a la zona central aquesta és més baixa. La comparació d'aquests estudi de perillositat amb estudis anteriors realitzats a la mateixa zona ha mostrat que tant la localització geogràfica de les zones amb una perillositat més alta com els valors de PGA obtinguts eren similars i, per tant, que es podia utilitzar aquest estudi per fer la comparació del que succeeix quan les falles són tingudes en compte. El següent pas ha estat introduir les falles com a fonts de terratrèmols a l'estudi probabilista de perillositat sísmica. En aquest cas s'ha assumit que la recurrència de terratrèmols seguia un comportament de terratrèmol característic, fet que requereix per cada una de les falles dades sobre la magnitud màxima del terratrèmol que pot generar, el període de recurrència d'aquest terratrèmol i quant de temps ha transcorregut des de que es va produir l'últim. El resultats obtinguts concorden amb l'estudi probabilista poissonià en la situació de les zones amb una perillositat més alta, però a més posa de rellevància una nova zona que es localitza a la part central de l'àrea d'estudi coincidint amb una sèrie de falles que han estat considerades actives. A més, s'ha vist que a mida que es valoraven períodes de retorn més llargs era en aquesta zona on es donaven els valors de perillositat més elevats. S'ha vist que el paràmetre sísmic que juga un paper més important en la variació dels resultats finals de l'anàlisi de la perillositat sísmica és el període de recurrència. Per tant, aquest paràmetre s'hauria de determinar amb la menor incertesa possible. Aquest estudi mostra que en zones de deformació lenta, on l'activitat sísmica és baixa però es té la certesa que s'hi poden produir grans terratrèmols, la inclusió de les falles que els podrien produir als estudis de perillositat sísmica pot millorar-los. Per tant, la identificació de les falles actives i l'estudi meticolós i acurat dels seus paràmetres sísmics poden arribar a ser essencials de cara a fer disminuir l'incertesa en quan a la localització de les fonts sísmiques als estudis de perillositat sísmica en zones de deformació lenta.

