

Confronto fra stime di pericolosità sismica in Italia

Marco Mucciarelli

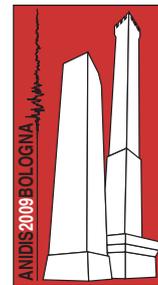
Dip. di Strutture, Geotecnica e Geologia Applicata, Università della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza

Dario Albarello

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Siena. Via Laterina, 8, 53100 Siena

Vera D'Amico

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, via della Faggiola, 32, 56126 Pisa



Keywords: Pericolosità Sismica, PSHA, Validazione,

RIASSUNTO

Allo scopo di valutare l'attendibilità delle stime di pericolosità sismica recentemente proposte per l'Italia sulla base di un approccio standard basato sull'impiego di informazioni geologiche (zone sismogenetiche) e sismologiche (catalogo sismico epicentrale), viene proposto un confronto con stime di pericolosità effettuate a partire dall'analisi statistica delle storie sismiche di sito relative alle 1401 località per le quali esistono informazioni circa gli effetti macrosismici osservati in occasione di almeno dieci terremoti del passato. In particolare, sono stati messi a confronto i valori dell'accelerazione massima orizzontale del moto del suolo corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni dedotti con l'approccio standard, con i valori dell'intensità macrosismica corrispondente alle stesse probabilità di eccedenza per un tempo di ritorno di 50 anni. Il confronto, effettuato con una procedura non parametrica che non richiede l'impiego relazioni di conversione empiriche, indica che le differenze osservate sono fortemente correlate con la geometria delle zone sismotettoniche utilizzate nell'approccio standard. In particolare, la zonazione sembra incompleta (sembrano esistere zone "nascoste") e a tratti troppo grossolana (a causa della scarsità dei dati disponibili) per rappresentare adeguatamente i processi sismogenici attivi nell'area italiana.

1 INTRODUZIONE

Le mappe di pericolosità sismica costituiscono uno strumento essenziale per la messa a punto di strategie volte alla riduzione dei danni attesi in occasione di futuri eventi sismici. Queste carte hanno lo scopo di identificare, sulla base di approcci di tipo probabilistico basati sull'analisi delle informazioni disponibili, dei valori ragionevoli del massimo scuotimento sismico nelle diverse parti del territorio. Dato che queste carte esprimono lo stato delle conoscenze in un dato momento, esse vanno periodicamente aggiornate per tenere conto dei progressi apportati alle conoscenze di base sui processi sismogenici nell'area di studio. Per esempio, in Italia negli ultimi dieci anni questi aggiornamenti hanno portato ad una successione di mappe di pericolosità sismica (e.g., Slejko *et al.*, 1998; Albarello *et al.*, 2000; MPS Working Group, 2004). Nessuno di questi aggiornamenti, garantisce però il valore intrinseco della mappa

come strumento di previsione della sismicità futura. Queste mappe sono infatti il prodotto di una serie di modelli concettuali che non subiscono modifiche ma solo riparametrazioni. Ciascuna mappa viene quindi ritenuta "migliore" delle precedenti perché più aggiornati sono i parametri che la caratterizzano mentre rimane in ombra la necessità di valutare su base empirica la qualità complessiva delle "previsioni" fornite da ciascuna mappa. Sebbene siano stati fatti sforzi in questo senso (Klügel, 2005; Musson *et al.*, 2005; Mucciarelli *et al.*, 2008; Albarello e D'Amico, 2008), il problema di stabilire criteri di validazione condivisi è stato oggetto di scarsa attenzione da parte degli operatori.

Una possibile strategia in questa direzione è quella di confrontare le carte di pericolosità sismica prodotte con gli approcci standard (p.es. Bender and Perkins, 1987), con la sismicità effettivamente osservata nell'area di studio (Mucciarelli *et al.*, 2000a; Musson, 2005; Stirling e Petersen, 2006). Queste informazioni sono dedotte da dati di tipo documentario ed hanno

quindi un carattere macrosismico. In paesi come l'Italia si tratta di una grande quantità di informazioni che costituisce la base delle nostre conoscenze sulla sismicità del passato: si pensi che oltre il 70% dei terremoti distruttivi noti dell'area italiana (CPTI Working Group, 2004) sono conosciuti solo si base macrosismica.

Allo scopo di valutare la coerenza fra le stime di pericolosità sismica dedotte per l'area Italiana con un approccio standard (MPS Working Group, 2004) con quanto osservato in occasione di terremoti del passato, queste stime sono state confrontate con altre valutazioni dedotte da un'analisi diretta delle storie sismiche relative a 1401 località capoluogo comunale del territorio italiano.

2 PROCEDURE ALTERNATIVE PER IL CALCOLO DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA IN ITALIA

2.1 L'approccio Standard

Su incarico del Dipartimento della Protezione Civile, un gruppo di lavoro coordinato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (MPS04: MPS Working Group, 2004) ha messo a punto una nuova carta di pericolosità sismica del territorio italiano. Questa nuova formulazione ha preso in considerazione la più recente compilazione di dati epicentrali relativa ai terremoti italiani e una nuova zonazione sismotettonica dell'area Italiana (ZS9 seismic zoning di Meletti *et al.*, 2008). La carta è stata compilata utilizzando il codice di calcolo SEISRISK III (Bender and Perkins, 1987), che rappresenta la più recente implementazione dell'approccio Cornell-McGuire (Cornell, 1968). Un approccio ad albero logico (Kulkarni, *et al.* 1984; Coppersmith e Youngs, 1986; EPRI, 1986) è stato quindi utilizzato per gestire le incertezze epistemiche relative alle diverse possibili parametrizzazioni del modello di calcolo (leggi di attenuazione, completezza, ecc.).

Il risultato di queste analisi è una mappa del valore di massima accelerazione del moto del suolo caratterizzata da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (A_{max}).

2.2 L'approccio "Di Sito"

Questo approccio è finalizzato alla stima della pericolosità sismica di un sito a partire da un'analisi statistica della sua storia sismica, ovvero degli effetti al sito dei terremoti del passato (Magri *et al.*, 1994; Albarello e Mucciarelli, 2002). In particolare, è stata adottata

l'implementazione della procedura relativa la codice SASHA (D'Amico and Albarello (2007, 2008).

La definizione della pericolosità sismica ad una dato sito viene effettuata in quattro fasi successive. Nella prima viene ricostruita la storia sismica locale a partire dai dati disponibili e tenendo conto delle incertezze associate alle singole valutazioni di intensità. Questa ricostruzione è stata effettuata utilizzando le informazioni contenute nel database macrosismico DBMI04 (Stucchi *et al.*, 2007). Nella seconda fase, queste storie sono integrate utilizzando dati epicentrali e opportune leggi di attenuazione di tipo probabilistico (Pasolini *et al.*, 2008). A questo scopo è stato utilizzato il catalogo sismico MPS04 (MPS04: MPS Working Group, 2004). Nella terza fase viene effettuata una valutazione del livello di rappresentatività della storia sismica così ricostruita (completezza) utilizzando un approccio di tipo statistico (Albarello *et al.*, 2001). Nella quarta fase viene calcolata una curva di pericolosità che rappresenta la probabilità di eccedenza relativa ad ogni possibile valore di intensità per l'intervallo di esposizione (50 anni in questo caso). A partire da questa curva viene quindi stimato il valore di Intensità caratterizzato da una probabilità di eccedenza del 10% (I_{ref}).

Da questa descrizione, risulta evidente che nell'approccio Di Sito non viene fatto alcun riferimento alla zonazione sismotettonica dell'area né da altre informazioni diverse da quelle del catalogo dei risentimenti macrosismici.

2.3 Modalità di confronto

I due approcci descritti sommariamente nei due paragrafi precedenti sono stati applicati alle 1401 località capoluogo comunale per le quali fosse disponibile una storia sismica di almeno 10 risentimenti documentati dal 1000 ad oggi. La distribuzione di queste località (Fig.1) copre con buona omogeneità l'intero territorio nazionale.

La difficoltà principale nell'eseguire un confronto fra le stime di pericolosità prodotte con i due approcci descritti sopra è la diversità dei parametri di scuotimento adottati: A_{max} e I_{ref} .

L'uso di leggi relazioni per la conversione di un parametro nella forma dell'altro (p.es., Margottini *et al.*, 1992; Faccioli and Cauzzi, 2006) andrebbe evitato per non introdurre nell'analisi ulteriori elementi di variabilità aleatoria. Il ricorso a queste relazioni può essere evitato se l'analisi si limita a confrontare il diverso ordinamento che i due approcci introducono fra i siti in funzione del relativo livello di pericolosità. A questo scopo a

ciascun valore di I_{ref} e A_{max} è stato attribuito un valore ordinale (rango) relativo al suo dominio di appartenenza. In pratica i valori di I_{ref} e A_{max} sono stati ordinati in modo decrescente ciascuno nel suo dominio: in questo modo i valori di rango più bassi corrispondono ai valori di I_{ref} e A_{max} più elevati. Nel caso di valori di scuotimento numericamente uguali (caso frequente nel dominio dei valori di intensità) a ciascun valore è stato attribuito lo stesso rango pari al valore medio dei ranghi di quel gruppo di valori.

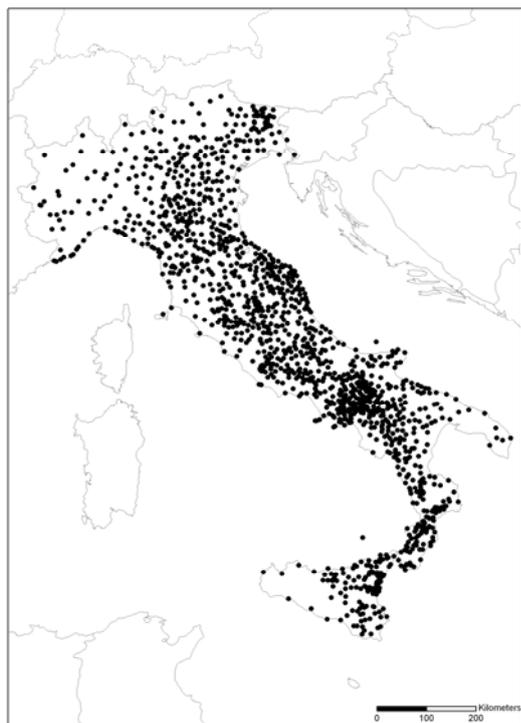


Figura 1. Distribuzione delle località capoluogo considerate nell'analisi

Per ciascuna località, è stato quindi calcolata la differenza di rango HD ($=\text{rango}(A_{max})-\text{rango}(I_{ref})$) che è stata considerata rappresentativa della corrispondente differenza nella stima di pericolosità. Valori positivi di HD indicano valori di I_{ref} relativamente più elevate della corrispondente stima di A_{max} , cioè, che l'approccio standard produce stime di pericolosità relativamente più basse di quelle determinate con l'approccio "di sito". Sembra logico aspettarsi che, laddove i due approcci producano risultati coerenti, i valori di HD siano vicini allo zero (per esempio località considerate relativamente più pericolose dovrebbero avere ranghi relativamente bassi in entrambe i casi) mentre le maggiori discrepanze siano indicate da valori elevati (sia in senso negativo che positivo) di HD.

3 ANALISI DEI RISULTATI

La distribuzione in frequenza dei valori di HD risulta con ottima approssimazione simmetrica e centrata sullo 0. Il 75% dei valori risulta compreso nell'intervallo ± 200 , pertanto nelle località caratterizzate da valori di HD compresi in quest'intervallo le due stime verranno giudicate fornire indicazioni di pericolosità in buona approssimazione concordi.

Un'analisi di correlazione indica che i valori di HD non risultano correlati in grado statisticamente significativo né con i valori assoluti di I_{ref} e A_{max} , né con il numero di dati disponibili al sito. Esiste invece una chiara correlazione con la posizione geografica, nel senso che i valori di HD tendono a raggrupparsi geograficamente in funzione del loro segno (Figg. 2 e 3). In particolare emerge una significativa dipendenza dalla geometria delle zone sismogenetiche (Meletti *et al.*, 2008) utilizzate per l'analisi standard.

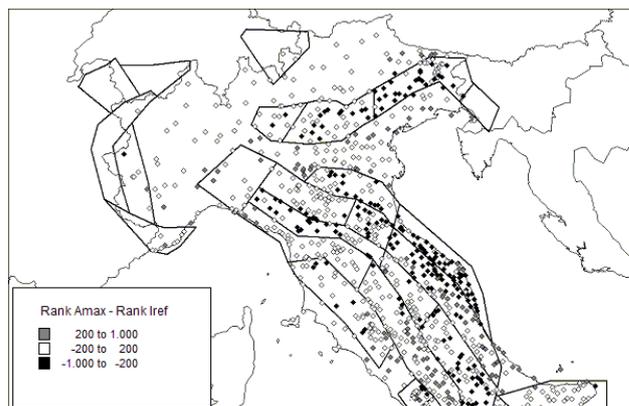


Figura 2. Distribuzione geografica dei valori di HD in Italia centro settentrionale in rapporto alle zone sismogenetiche considerate nell'analisi standard

Un'ispezione visuale delle figure 2 e 3 suggerisce mostra che nei siti collocate fuori dalle zone sismogenetiche (ovvero nei siti dove si presume non vengano generate forti terremoti) i valori di HD risultano generalmente positivi, indicando che l'approccio standard tende a fornire valori di pericolosità relativamente più bassi di quelli suggeriti dalle storie sismiche di sito. Il contrario è vero per molte località poste all'interno delle zone sismogenetiche. Questa indicazione è confermata da una analisi di dettaglio che mostra uno spostamento significativo dell'HD medio dei siti posti all'esterno delle zone sismogenetiche verso valori positivi.

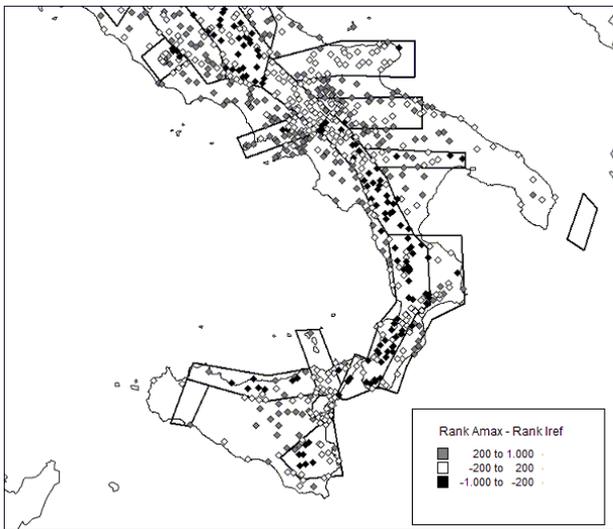


Figura 3. Distribuzione geografica dei valori di HD in Italia centro meridionale in rapporto alle zone sismogenetiche considerate nell'analisi standard

Inoltre, dall'esame delle figure 2 e 3, si vede come valori di HD dello stesso segno tendono a polarizzarsi e dominare diverse zone sismogenetiche. Questo implica che esiste un effetto sistematico che dipende dalla zonazione sismotettonica adottata.

Per porre questa osservazione su basi più quantitative, è stato effettuato un test non parametrico sul valore della mediana dei valori di HD relativa ciascuna zona. In particolare, per ciascuna zona è stata valutata la significatività statistica dello scarto della mediana dal valore nullo individuando le zone dominate da valori HD positivi o negativi. I risultati di questa analisi sono mostrati in figura 4.

Si è detto che, in generale, l'approccio standard fornisce stime di pericolosità più basse rispetto a quanto dedotto dalle storie di sito nelle località poste al di fuori delle zone sismogenetiche. Per le località poste all'interno di queste zone è in genere vero il contrario. Tuttavia, quest'ultimo risultato è frutto di una molteplicità di situazioni differenti. Per esempio, nelle Alpi Orientali (zone 905, 906, 907 in Fig. 4), nella parte assiale degli Appennini (913, 914, 915, 919, 923, 927 e 929), sul versante adriatico degli Appennini Settentrionali (912 e 917) e nella Sicilia Orientale (935), dominano valori di HD negative: questo implica che in queste zone, l'approccio standard fornisce valori di pericolosità sistematicamente maggiori di quanto ci si aspetta sulla base delle storie sismiche di sito. Al contrario, lungo il margine tirrenico degli Appennini (916, 921, 928 e 932 in Figura 4) i valori positivi di HD dominano, indicando che in queste zone le stime standard sono generalmente minori di quanto ci si aspetterebbe sulla base delle storie sismiche di sito.

Il carattere sistematico della distribuzione geografica dei valori di HD suggerisce che differenze osservate fra le stime di pericolosità dedotte dai due differenti approcci non possono essere attribuite a situazioni locali (condizioni di sito) ma devono essere messe in relazione a caratteristiche di base delle diverse metodologie di stima della pericolosità. In particolare, questi risultati suggeriscono l'esistenza di un effetto sistematico che dipende dalla geometria delle zone sismogenetiche adottate dall'approccio standard basato sul metodo Cornell-McGuire.

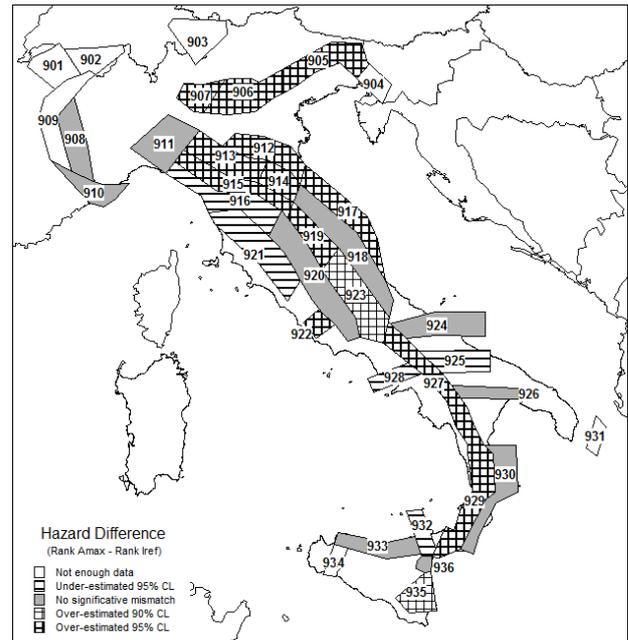


Figura 4. Risultati del test statistico relativo alla dominanza di valori negativi o positivi di HD nelle diverse zone sismogenetiche utilizzate nell'analisi standard. Ciascuna zona è identificata da un codice numerico. Il termine "under-estimate" indica che la mediana dei valori HD relativi alla zona è significativamente diversa da zero e spostata verso valori positivi. Il contrario vale per il termine "over-estimate". "CL" indica il livello di confidenza rilevato dal test.

4 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

È stato effettuato un primo confronto fra le stime di pericolosità sismica in Italia condotte con l'approccio standard di Cornell-McGuire con quelle ottenute dall'analisi statistica delle storie sismiche di sito relative a 1401 località capoluogo comunale distribuite su tutto il territorio nazionale. In linea di principio, nessuna delle due stime può essere considerata a priori migliore. Tuttavia, la seconda, essendo più direttamente legata alle osservazioni disponibili, può essere considerata come più rappresentativa della sismicità effettivamente osservata nell'area italiana.

L'analisi condotta ha mostrato che i due approcci forniscono stime differenti e che queste differenze sembrano fortemente legate alla geometria delle zone sismogenetiche adottata nell'approccio standard. Si vede infatti che le stime fornite da quest'ultimo approccio tende a sottostimare la pericolosità delle località poste al di fuori delle zone sismogenetiche ed a sopravvalutare quella delle località poste all'interno di queste, soprattutto nelle aree caratterizzata da maggiore sismicità (parte assiale della catena Appenninica, Alpi Orientali).

L'effetto sistematico relativo alle località poste al di fuori delle zone sismogenetiche, ovvero dove le leggi di attenuazione giocano un ruolo centrale nel calcolo della pericolosità, potrebbero indicare che queste ultime relazioni siano inadeguate. Una possibile spiegazione alternativa potrebbe essere che in queste aree di sismicità "diffusa" possano esistere altre zone sismogenetiche che non sono state considerate nella zonazione adottata. Quest'ultima spiegazione è anche corroborata dalla concentrazione di valori con lo stesso segno (Figg. 2 e 3).

Per quanto riguarda le località poste all'interno delle zone sismogenetiche, l'esame delle Figure 2 e 3 mostra una concentrazione di valori con lo stesso segno in settori specifici della zone (si veda per esempio quanto avviene nella zone 927 con differenze sistematiche fra la parte meridionale e settentrionale della stessa zone). Questo potrebbe essere l'effetto di una errata parametrizzazione della sismicità media della zona, che potrebbe rivelarsi inadeguata per le sue diverse parti.

In generale, questi risultati sembrano suggerire che la distribuzione della sismicità è meno omogenea di quanto ipotizzato nella formulazione dell'approccio standard. Analisi condotte in passato (Mucciarelli, 2005) sembrano confermare questa ipotesi, suggerendo un elevato livello di concentrazione della sismicità sia nello spazio che nel tempo (Faenza *et al.*, 2003). Questa caratteristica sembra un elemento comune a molte zone del mondo (Gómez and Pacheco, 2004).

Le analisi descritte, sembrano quindi suggerire una revisione della zonazione sismogenetica da utilizzare per l'applicazione dell'approccio standard al calcolo della pericolosità in Italia. D'altra parte, bisogna tuttavia tenere conto che una simile riformulazione richiederebbe una generale riduzione delle dimensioni delle zone, allo scopo di meglio riprodurre l'elevato livello di concentrazione della sismicità osservata. Una simile riduzione, però, implica che le informazioni disponibili per la parametrizzazione

di ciascuna zona subirebbero una riduzione che in alcuni casi renderebbe statisticamente non significativi i risultati dell'analisi di pericolosità. Algermissen *et al.* (1982) hanno infatti suggerito un limite inferiore di almeno 40 eventi sismici in ciascuna zona per consentire una corretta applicazione della metodologia standard. Bender (1983) ha anche suggerito che con meno di 25 eventi gli errori sul tasso di sismicità (valore del parametro b di Gutenberg e Richter) raggiungono il 25%. Già con la zonazione adottata per le stime in Italia, almeno 18 delle 36 zone risultano sottocampionate secondo gli standard Algermissen *et al.* e che 11 su 36 includono meno di 25 eventi. Tutto questo suggerisce che ogni ulteriore riduzione delle dimensioni delle zone potrebbe rendere inaffidabili le stime di pericolosità risultanti.

Questo suggerisce che l'adozione di metodi di stima della pericolosità sismica che non richiedono ipotesi sulla geometria delle zone sismogenetiche (p.es., Frankel, 1995; Woo, 1996; Albarello and Mucciarelli, 2002; Lapajne *et al.*, 2003; Akinci *et al.*, 2004) dovrebbero essere preferite per la stima della pericolosità sismica in Italia. Inoltre, dati i possibili effetti di sotto/sovra stima indotti dall'adozione di relazioni di attenuazione del moto del suolo localmente inadeguate, un maggiore uso di informazioni dirette (storie sismiche di sito) potrebbe essere di grande utilità.

REFERENCES

- Akinci A., Mueller C., Malagnini L. and Lombardi A. (2004). Seismic hazard estimate in the Alps and Apennines (Italy) using smoothed historical seismicity and regionalized predictive ground motion relationships, *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, 45, 285-304.
- Albarello D. (2007). Seismic hazard assessment: management of uncertainty and validation. Atti della riunione intermedia 2007. Società Italiana di Statistica, CLEUP, Padova, 351-360.
- Albarello D., Azzaro R., Barbano M.S., D'Amico S., D'Amico V., Rotondi R., Tuvè T. and Zonno G. (2007). Valutazioni di pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica utilizzando metodi di sito. INGV-DPC Project S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d9.html>
- Albarello D., Bosi V., Brammerini F., Lucantoni A., Naso G., Peruzza L., Rebez A., Sabetta F. and Slejko D. (2000). Carte di Pericolosità sismica del territorio nazionale. *Quad. Geofis.*, 12, 1-8.
- Albarello D., Camassi R. and Rebez A. (2001). Detection of Space and Time Heterogeneity in the Completeness of a Seismic Catalog by a Statistical Approach: An Application to the Italian Area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 1694-1703.
- Albarello D. and Mucciarelli M. (2002). Seismic hazard estimates from ill-defined macroseismic data at a site, *Pure Appl. Geophys.*, 159, 6, 1289-1304.
- Albarello D., Brammerini F., D'Amico V., Lucantoni A. and Naso G. (2002). Italian intensity hazard maps: a

- comparison of results from different methodologies, *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 43, 249-262.
- Albarello D., D'Amico V., 2008. Testing probabilistic seismic hazard estimates by comparison with observations: an example in Italy. *Geophys.J.Int.*, 175, 1088–1094, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03928.x
- Algermissen S.Th., Perkins D.M., Thenhaus P.C., Hanson S.L., Bender B.L. (1982). Probabilistic estimates of maximum acceleration and velocity in rock in the contiguous United States, USGS Open-File Report 82-1033, 107 pp.
- Azzaro R., Barbano M.S., Moroni A., Mucciarelli M. and Stucchi M. (1999). The seismic history of Catania, *Journal of Seismology*, 3, 235-252.
- Bakun W.H. (2006). Estimating Locations and Magnitudes of Earthquakes in Southern California from Modified Mercalli Intensities, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, 1278-1295.
- Bender B. (1983). Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 831-851.
- Bender B. and Perkins D.M. (1987). SeisriskIII: a computer program for seismic hazard estimation. *U.S.Geological Survey*, 1772, 1-48.
- Carletti F. and Gasperini P. (2003). Lateral variations of seismic intensity attenuation in Italy, *Geoph. J. Int.*, 155, 839-856.
- Coppersmith K.J. and Youngs R.R. (1986). Capturing Uncertainty in Probabilistic Seismic Hazard Assessments within Intraplate Environments, *Proceedings of the Third U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, August 24-28, 1986, Charleston, SC, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, Vol I, pp 301-312.
- Cornell C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- CPTI Working Group (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, *Ed. Compositori, Bologna, Italy*, pp. 88, also available at <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/home.html>
- D'Amico V. and Albarello D. (2007). Codice per il calcolo della pericolosità sismica da dati di sito: SASHA (Site Approach to Seismic Hazard Assessment). INGV-DPC Project S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d12.html>
- D'Amico V. and Albarello D. (2008). SASHA: a computer program to assess seismic hazard from intensity data, *Seism. Res. Lett.*, accepted.
- D'Amico V., Albarello D. and Mucciarelli M. (2002). Validation through HVSr measurements of a method for the quick detection of site amplification from intensity data: an application to a seismic area in Northern Italy, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 22, 475-483.
- D'Amico V., Albarello D., 2008. SASHA: a computer program to assess seismic hazard from intensity data. *Seism.Res.Lett.*, 79, 5, 663-671
- Electric Power Research Institute (1986). Seismic hazard methodology for the Central and Eastern United States, *EPRI NP-4726*.
- Faccioli E. and Cauzzi C. (2006). Macroseismic intensities for seismic scenarios estimated from instrumentally based correlations, *Proc. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, paper number 569.
- Faenza L., Marzocchi W. and Boschi E. (2003). A non-parametric hazard model to characterize the spatio-temporal occurrence of large earthquakes; an application to the Italian catalogue, *Geophys. J. Int.*, 155, 521-531.
- Frankel A. (1995). Mapping seismic hazard in the central and eastern United States, *Seism. Res. Lett.* 66, 8-21.
- Galea P., 2007. Seismic history of the Maltese islands and considerations on seismic risk. *Ann. Geophys.* 50, 6, 725-740
- Gallipoli M.R., Albarello D., Mucciarelli M., Lapenna V., Schiattarella M. and Calvano G. (2002). Hints about site amplification effects comparing macroseismic hazard estimate with microtremor measurements: the Agri Valley (Italy) example, *Journ. Earthq. Eng.*, 7, 1, 51-72.
- Giardini D. (ed.) (1999). The Global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999, *Ann. Geofis.*, 42, 6, 957-1230.
- Gómez J.B. and Pacheco A.F. (2004). The minimalist model of characteristic earthquakes as a useful tool for description of the recurrence of large earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 1960-1967.
- Klügel J.-U. (2005). Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants, *Engineering Geology*, 78, 285–307.
- Kulkarni R.B., Youngs R.R. and Coppersmith K.J. (1984). Assessment of the confidence intervals for results of seismic hazard analysis. *Proceedings, 8th World Conference of Earthquake Engineering*, San Francisco, Vol.1, 263-270.
- Lapajne J., Sket Motnikar B. and Zupancic P. (2003). Probabilistic Seismic Hazard Assessment Methodology for Distributed Seismicity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 2502-2515.
- Leydecker G., Busche H., Bonjer K.-P., Schmitt T., Kaiser D., Simeonova S., Solakov D., Ardeleanu L., 2008. Probabilistic seismic hazard in terms of intensities for Bulgaria and Romania – updated hazard maps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 1431–1439
- Magri L., Mucciarelli M. and Albarello D. (1994). Estimates of site seismicity rates using ill-defined macroseismic data, *Pure Appl. Geoph.*, 143, 618-632.
- Margottini, C., Molin D. and Serva L. (1992). Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data, *Engineering Geology*, 33, 1, 45-58.
- Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba S., Vannucci G. and Boschi E. (2008). A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory, *Tectonophysics* 450, 85-108.
- Monachesi G., Peruzza L., Slejko D. and Stucchi, M. (1994). Seismic hazard assessment using intensity point data. *Soil Dyn. Earthq. Engin.*, 13, 219-226.
- MPS Working Group (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, April 2004, 65 pp. + 5 appendices, <http://zonesismiche.mi.ingv.it>
- Mucciarelli M. (2005). What is a surprise earthquake? The example of the 2002, San Giuliano (Italy) event, *Annals Geoph.*, 48, 273-278.
- Mucciarelli M., Peruzza L. and Caroli P. (2000a). Tuning of seismic hazard estimates by means of observed site intensities. *Journ. Earthq. Engin.*, 4, 141-159.
- Mucciarelli M., Valensise G., Gallipoli M.R. and Caputo R. (2000b). Reappraisal of A XVI century earthquake combining historical, geological and instrumental information, in V. Castelli (ed.) *Proceedings of 1st Workshop of E.S.C. on Historical Seismology*, Macerata (Italy), 1999.
- Mucciarelli M., Albarello D., D'Amico V., 2008. Comparison of Probabilistic Seismic Hazard estimates

- in Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 98, No. 6, pp. 2652–2664, doi: 10.1785/0120080077
- Musson R.M.W. (2005). Intensity attenuation in the UK, *Journal of Seismology* 9, 73–86.
- Musson R.M.W. (2006). Objective validation of seismic hazard models. *Proceedings 13th World conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Paper n. 2492
- Musson R.M.W., Coppersmith K.J., Bommer J.J., Deichmann N., Toro G.R., Bungum H., Cotton F., Scherbaum F., Slejko D. and Abrahamson N.A. (2005). Evaluating hazard results for Switzerland and how not to do it: A discussion of “Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants” by J-U. Kluegel, *Engineering Geology*, 82, 43–55.
- Papoulia J., and Slejko D. (1997). Seismic Hazard Assessment in the Ionian Islands Based on Observed Macroseismic Intensities, *Natural Hazards* 14, 179-187.
- Pasolini C., Albarello D., Gasperini P., D’Amico V. and Lolli B. (2008). The attenuation of seismic intensity in Italy part II: modeling and validation, *Bull. Seism. Soc. Am* 98, 692-708.
- Slejko D., Peruzza L. and Rebez A. (1998). Seismic hazard maps of Italy, *Ann.Geofis.*, 41, 183-214.
- Stirling M. and Petersen M. (2006). Comparison of the historical record of earthquake hazard with seismic hazard models for New Zealand and the Continental United States. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, 6, 1978-1994.
- Stucchi M., Camassi R., Rovida A., Locati M., Ercolani E., Meletti C., Migliavacca P., Bernardini F. and Azzaro R. (2007). DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>. Quaderni di Geofisica, INGV, 49, 1-38.
- Woo G. (1996). Kernel estimation method for seismic hazard area source modeling, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 353-362.