

**G. Vilardo, R. Nappi, P. Petti e G. Ventura**

Osservatorio Vesuviano, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Napoli

## APPLICAZIONE DI TECNICHE DI COLLASSAMENTO IPOCENTRALE A DUE SEQUENZE SISMICHE DI BASSA ENERGIA NELL'APPENNINO MERIDIONALE

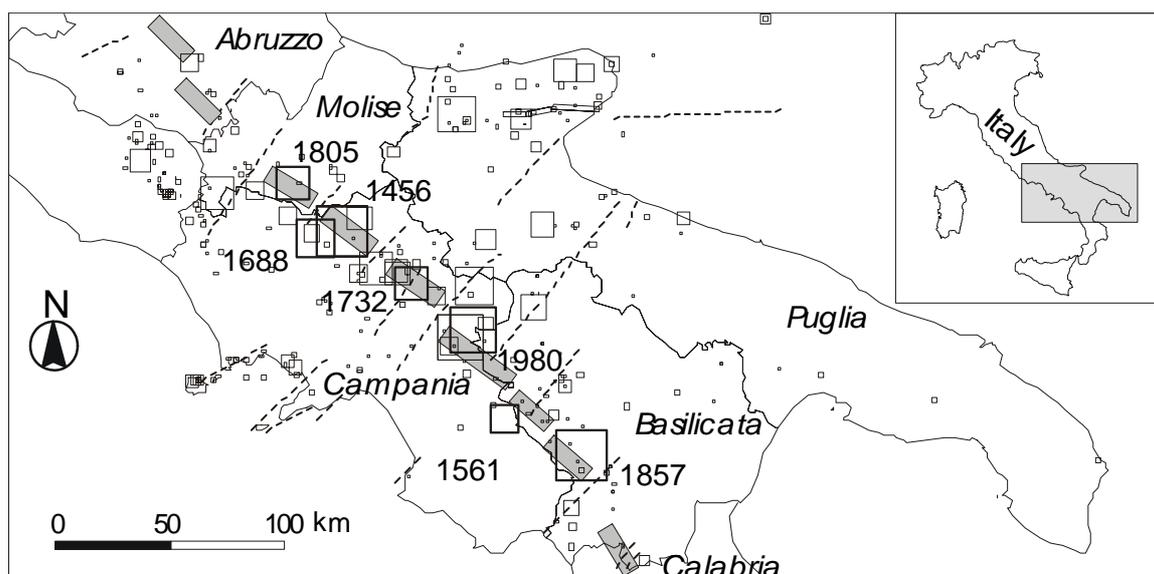
**Riassunto.** Sono state analizzate due sequenze sismiche che hanno interessato l'area compresa fra i monti del Matese ed il Sannio avvenute rispettivamente nel 1990 e nel 1997. L'area in esame è caratterizzata da un'intensa e complessa attività geodinamica ed è stata più volte interessata in tempi storici da terremoti distruttivi; le due recenti sequenze sismiche considerate hanno manifestato un rilascio di energia relativamente contenuto ( $M_{max}$  3.6 e 4.1, rispettivamente). I dati relativi alle distribuzioni ipocentrali degli eventi appartenenti ad entrambe le sequenze sono stati analizzati mediante l'applicazione di un algoritmo di collassamento della nube ipocentrale. L'utilizzo di tale tecnica è finalizzato alla caratterizzazione delle strutture attivate sulla base di un'analisi simultanea effettuata sui parametri spaziali relativi alle localizzazioni ipocentrali ed alle incertezze loro associate. I risultati ottenuti evidenziano che: la distribuzione ipocentrale degli eventi della sequenza del Beneventano 1990 suggerisce la coesistenza di faglie sintetiche-antitetiche con la struttura principale, con direzione NO-SE ed immersione verso NE, situata in corrispondenza della faglia attivata durante il forte terremoto del 1688 ( $I_{o,max} = XI$  MCS); gli eventi della sequenza del 1997 si allineano in direzione NNE-SSO, all'incrocio tra i prolungamenti delle faglie responsabili degli eventi avvenuti nel 1456-1688 e di quello del 1805 ( $I_o = X$  MCS). I meccanismi focali relativi agli eventi appartenenti ad entrambe le sequenze indicano movimenti distensivi con orientamento dell'asse di estensione rispettivamente in direzione NE-SO e NO-SE. Il quadro deformativo risultante, caratterizzato da due direzioni di estensione tra loro ortogonali, suggerisce pertanto processi di estensione longitudinale e trasversale che interessano la catena appenninica.

### ANALYSIS OF LOW ENERGY SEISMIC SEQUENCES IN THE SOUTHERN APENNINES BY HYPOCENTERS COLLAPSING TECHNIQUE

**Abstract.** In this study we analyse two recent low energy ( $M_{dmax} = 4.1$ ) seismic sequences (1990-1997) that affected the northern sector (Sannio-Benevento area) of the Southern Apennines chain. We applied the Best Estimate Method to earthquake locations in order to constrain the position and geometry of the seismogenic structures. The most striking features of the obtained fault geometries indicate that earthquakes of the 1990 Benevento sequence align along a NW-SE striking structure, while the earthquakes of the 1997 Sannio sequence outline a NNE-SSW striking structure. The southernmost NW-SE structure dips towards the NE, is characterized by a conjugate fault arrangement and overlies the fault responsible for a larger historical earthquake ( $I_{o,max} = XI$  MCS, 1688 earthquake). Available focal mechanisms from earthquakes that occurred on the recognized NW-SE and NE-SW faults are consistent with dip-slip normal solutions. This suggests the occurrence of coexisting NW-SE and NE-SW extension in the Southern Apennines.

### INTRODUZIONE

Il Sannio-Benevento è tra le aree dell'Appennino meridionale maggiormente attive dal punto di vista sismico (Fig. 1) ed in passato è stato interessato dall'accadimento di numerosi terremoti distruttivi ( $I_o = X-XI$ ). Dopo l'ultimo forte terremoto avvenuto in Irpinia nel 1980, il rilascio di energia sismica in questo settore dell'Appennino meridionale è stato caratterizzato da sequenze sismiche di bassa energia localizzate sia all'estremità sud-orientale dell'area di faglia del 1980, sia a nord ovest dell'area di fratturazione associata all'evento del 1732 (Fig. 1).



**Fig. 1** - Inquadramento sismotettonico dell'Appennino meridionale. I quadrati rappresentano i terremoti storici estratti dal catalogo CPTI (CPTI, 1999); le dimensioni del quadrato sono proporzionali alla magnitudo dell'evento. I rettangoli grigi rappresentano la proiezione in superficie delle faglie sismogenetiche (Valensise and Pantosti, 2001); le linee tratteggiate rappresentano i lineamenti tettonici trasversali riportati nel catalogo "Database of Potential Earthquakes Sources" (Valensise and Pantosti, 2001).

Nel settore sud-orientale (confine Campania-Basilicata) tali episodi di sismicità hanno dato luogo a sequenze di moderata energia di tipo mainshock–aftershocks (Alessio et al., 1995), mentre nel settore nord-occidentale (confine Campania-Molise) la sismicità è stata caratterizzata dall'accadimento di sciami di eventi di bassa magnitudo. Le sequenze sismiche più significative che hanno interessato l'area del Sannio-Matese si sono verificate negli anni 1990 ( $M_{dmax} = 3.6$ ) e 1997 ( $M_{dmax} = 4.1$ ) e risultano localizzate in aree molto circoscritte (Federici et al., 1992; Alessio et al., 1996; Milano et al., 1999).

Scarse informazioni sono disponibili relativamente alle strutture tettoniche attivate durante sequenze sismiche di bassa energia nell'Appennino meridionale, pertanto, allo scopo di definirne le caratteristiche geometriche, sono state analizzate le distribuzioni ipocentrali della sismicità che si è verificata nel 1990 e nel 1997 nell'area del Sannio-Benevento mediante l'applicazione del Metodo della Miglior Stima (MMS; Bossu, 2000).

L'interpretazione dei risultati ottenuti dall'applicazione del MMS ha permesso di porre vincoli sulla posizione e geometria delle strutture sismogenetiche attivate e con l'analisi dei meccanismi focali e di chiarire la connessione, in termini cinematici, tra le strutture a direzione appenninica NO-SE, responsabili degli eventi storici di più elevata energia, e quelle a direzione antiappenninica NE-SO.

## ASSETTO SISMOTETTONICO DELL'AREA DEL SANNIO-BENEVENTANO

La formazione della catena dell' Appennino meridionale è connessa alla subduzione (verso ovest) della litosfera Apulo-Ionica. A partire dal Pliocene Sup. il settore interno della catena comincia ad essere interessato da una tettonica estensionale NNO-SSE (Oldow et al., 1993; Ferranti et al., 1996; Doglioni, 1996; Sorgi et al., 1998). Dal Pleistocene Med.-Sup., un importante cambio geodinamico

caratterizza l'evoluzione tettonica innescando una fase di veloce sollevamento ( $\sim 1$  mm/anno) al quale si aggiunge un'estensione dominante in direzione NE-SO (Cinque et al., 1993; Westaway, 1993; Hippolyte et al., 1994; Patacca et al., 1997). Le faglie normali a direzione NO-SE, parallele all'asse della catena, si sono sviluppate in risposta a questa estensione (Valensise and Pantosti, 1993; Valensise and Pantosti, 2001). Nel settore appenninico compreso tra il Molise e la Basilicata, queste faglie, formano una fascia quasi continua. Gli eventi sismici distruttivi ( $I_o = X-XI$  MCS) avvenuti in epoca storica negli anni 1805, 1456, 1688, 1702, 1732, 1962, e 1980 sono stati generati lungo tali strutture (Fig. 1) (Gasparini et al., 1985; C.P.T.I., 1999; Valensise and Pantosti, 2001). I meccanismi focali degli eventi più energetici, come per quelli del 1962 ( $M = 6.1$ ) e del 1980 ( $M = 6.9$ ) (Gasparini et al., 1985) mostrano soluzioni di tipo normale consistenti con un'estensione in direzione NE-SO. Questa estensione è consistente con i dati strutturali derivati dallo studio di faglie oloceniche (Hippolyte et al., 1994) e da analisi di breakout (Amato and Montone, 1997). I terremoti di maggior energia ( $I_o \geq X$  MCS) localizzati nell'area del Sannio-Benevento si sono verificati negli anni 1456, 1688, 1732 e 1805. Questi terremoti sono stati localizzati sui segmenti di faglia a direzione NO-SE. Faglie in direzione NE-SO sono ubicate tra le principali faglie a direzione NO-SE (Fig. 1). Il significato strutturale delle faglie a direzione NE-SO è tuttora poco definito. Esse sono state interpretate come: (a) antiche faglie con movimento di strike-slip sinistro formatesi in risposta a differenti velocità di migrazione verso est dei fronti dei thrust (Sorgi et al., 1998), (b) l'espressione superficiale delle principali discontinuità litosferiche che interessano l'avampaese Apulo (Ortolani et al., 1992), (c) faglie di trasferimento di tipo strike-slip posizionate tra le principali faglie normali a direzione NO-SE (Gasparini et al., 1985), (d) faglie normali generate dalla progressiva curvatura ed assottigliamento del settore interno della catena (Oldow et al., 1993; Doglioni, 1996; Ferranti et al., 1996). Sulla base di quest'ultima ipotesi, le faglie a direzione NE-SO sarebbero da porre in relazione a processi di estensione longitudinale (cioè estensione parallela all'asse della catena).

Eventi di bassa magnitudo ( $M < 5$ ), verificatisi sia in tempi storici sia più recentemente, si verificano lungo le faglie a direzione NE-SO. I dati relativi alle più recenti crisi sismiche indicano movimenti normali connessi ad una estensione NO-SE (Milano et al., 1999).

## ANALISI DEI DATI

L'interpretazione e l'assegnazione di un insieme di piccoli terremoti alle strutture sismogenetiche che l'hanno causati, non è un compito semplice. Le localizzazioni sono infatti soggette ad incertezze dovute ad una serie di fattori, tra i quali i principali sono: il numero e la distribuzione spaziale delle stazioni sismiche che hanno rilevato l'evento, le imprecisioni nella determinazione dei tempi d'arrivo delle fasi sismiche sul sismogramma nonché la conoscenza limitata o l'estrema semplificazione del modello di velocità utilizzato nel calcolo ipocentrale. Tali incertezze possono modificare in modo significativo la distribuzione ipocentrale rendendo spesso impossibile l'individuazione di allineamenti significativi tali da poter essere interpretati in termini di strutture sismogenetiche.

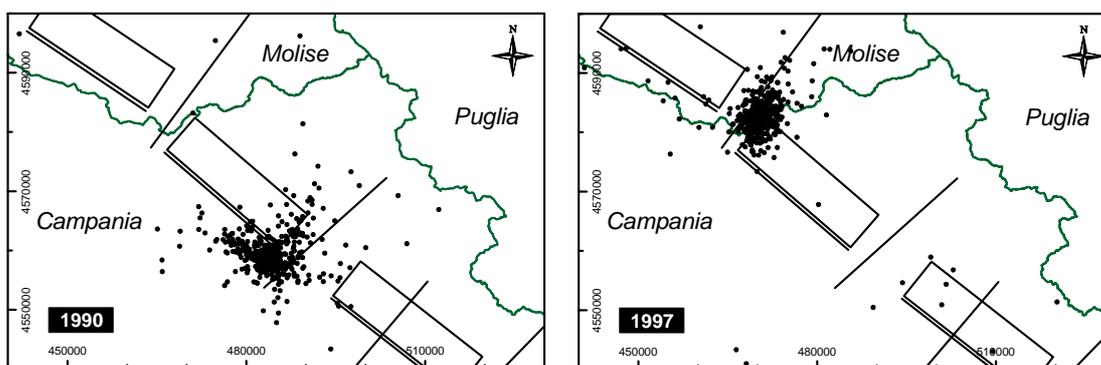
Negli ultimi anni sono state proposte da vari autori differenti tecniche per l'analisi di distribuzioni ipocentrali allo scopo di semplificarne la geometria riducendo l'effetto degli errori associati alla determinazione dei parametri di localizzazione

(Frohlich, 1979; Feheler et al., 1987; Jones e Stewart, 1997; Bossu, 2000; Asanuma et al., 2001).

Tra i metodi recentemente proposti in letteratura, rivolti ad analizzare distribuzioni ipocentrali per l'individuazione di geometrie semplici di strutture sismogenetiche, è stato scelto ed applicato alla sismicità in esame il metodo della miglior stima (MMS) sviluppato da Bossu (2000). Tale metodo effettua un'analisi simultanea sui parametri spaziali relativi sia alle localizzazioni ipocentrali, sia alle incertezze loro associate, e si basa sull'assunzione che eventi la cui distanza ipocentrale è più piccola dell'incertezza stimata sulla loro localizzazione, possono essere considerati come misure indipendenti della stessa variabile: la posizione locale della struttura sismogenetica.

I dati utilizzati per l'analisi sono quelli relativi ai parametri di localizzazione relativi a circa 800 eventi appartenenti alle due sequenze sismiche in esame estratti dal catalogo sismico della regione Campania (Vilardo et al., 2001).

La mappa delle distribuzioni epicentrali ottenute sulla base dei parametri di localizzazione così come estratti dal catalogo (Fig. 2) mostrano un elevato grado di raggruppamento spaziale, ma non evidenziano allineamenti di epicentri particolarmente significativi.



**Fig. 2** - Distribuzioni epicentrali originali relative alle sequenze analizzate (dati estratti dal catalogo SISCam: Vilardo et al., 2001). Rettangoli = piani di faglia dei forti terremoti, la doppia linea rappresenta l'intersezione del piano di faglia con la superficie; linee = lineamenti trasversali (Valensise and Pantosti, 2001). Sono anche riportati per riferimento I confini regionali.

Si è proceduto, pertanto, ad analizzare le distribuzioni ipocentrali di Fig. 2 mediante l'applicazione della tecnica descritta da Bossu (2000).

A tal fine, per ogni evento  $i$ , con coordinate  $X_i$ ,  $Y_i$  and  $Z_i$  ed incertezze associate  $e_x(i)$ ,  $e_y(i)$  ed  $e_z(i)$ , è stata dapprima determinata la lista degli eventi la cui localizzazione iniziale ricadeva all'interno del suo volume di incertezza. Ciò è stato realizzato selezionando tutti gli eventi per cui risultava verificata la seguente espressione:

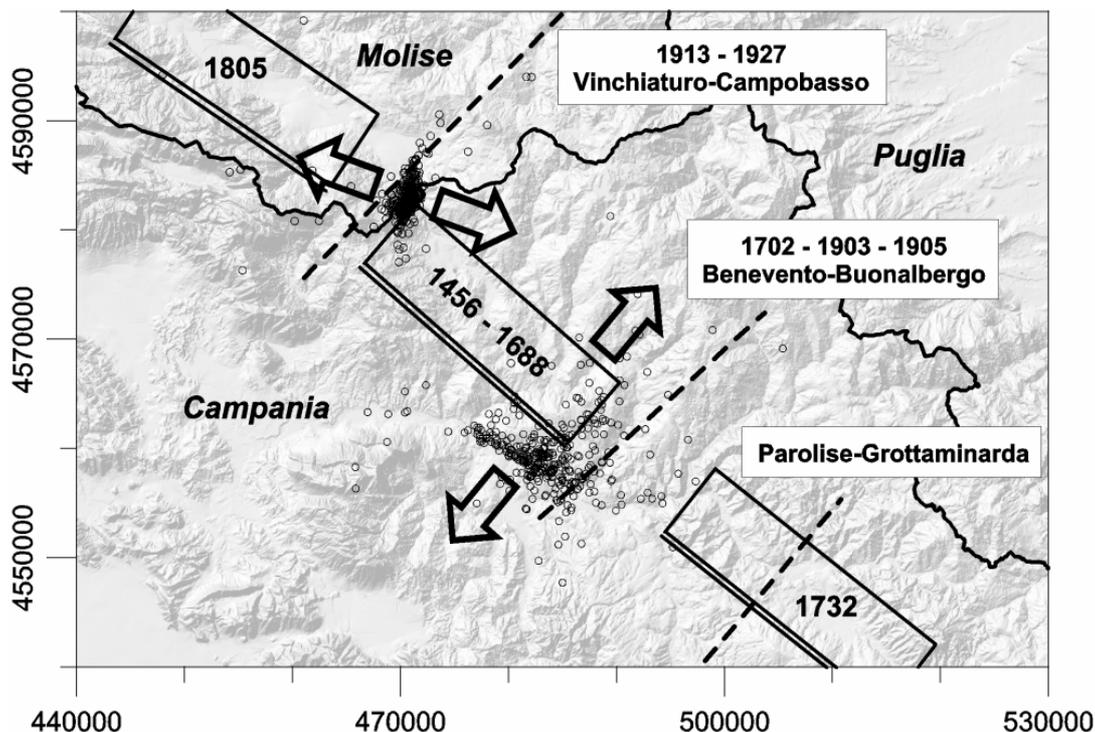
$$[\Delta x_{ij} < (e_x(i) + e_x(j))] \text{ .and. } [\Delta y_{ij} < (e_y(i) + e_y(j))] \text{ .and. } [\Delta z_{ij} < (e_z(i) + e_z(j))] \quad (1)$$

dove:

$$\Delta x_{ij} = |X_i - X_j|; \Delta y_{ij} = |Y_i - Y_j|; \Delta z_{ij} = |Z_i - Z_j|;$$

La nuova posizione dell'evento  $i$  è stata poi stimata calcolando il baricentro delle localizzazioni ipocentrali relative agli eventi che soddisfacevano l'equazione 1.

Questi due passaggi sono stati ripetuti per tutti gli eventi delle sequenze analizzate ed il risultato ottenuto è mostrato in Fig. 3.



**Fig. 3** - Risultato dell'applicazione del MMS alle sequenze sismiche del 1990 e 1997. Le frecce rappresentano l'orientazione preferenziale degli assi-T sub-orizzontali dedotti dall'analisi dei meccanismi focali. I rettangoli e le linee tratteggiate rappresentano rispettivamente la proiezione in superficie delle faglie sismogenetiche i lineamenti tettonici trasversali riportati nel catalogo "Database of Potential Source" (Valensise and Pantosti, 2001).

## RISULTATI E CONCLUSIONI

Per la sequenza del 1990 si osserva un allineamento in direzione NO-SE situato sul prolungamento della faglia responsabile dell'evento irpino del 1732 ( $I_0 = X$  MCS), e/o parallelamente alla faglia responsabile degli eventi del 1456 e del 1688 ( $I_0 = XI$  MCS), sempre in direzione appenninica (Fig. 3). La distribuzione epicentrale è poi vincolata a SE dalla struttura trasversale probabile responsabile degli eventi del 1702, 1903, 1905, ( $I_0 = X$  MCS) tra Benevento e Buonalbergo (Ortolani et al., 1992).

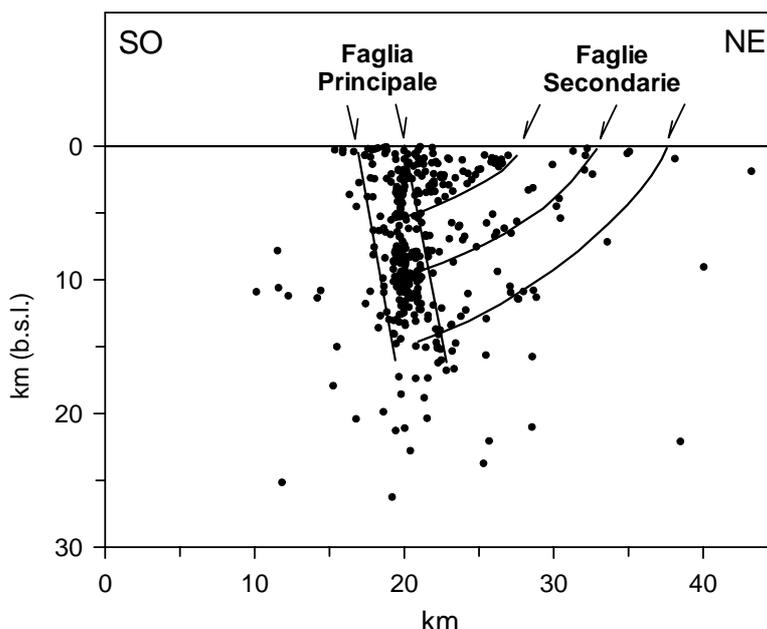
I meccanismi focali della sequenza del 1990 (Alessio et al., 1996) indicano movimenti distensivi in direzione NE-SO.

La distribuzione degli eventi relativi alla sequenza del 1997, come già rilevato da Milano et al. (1999), evidenzia un allineamento degli epicentri in direzione NNE-SSO. Questo allineamento è situato all'incrocio tra i prolungamenti delle faglie responsabili degli eventi avvenuti nel 1456-1688 e di quello del 1805 ( $I_0 = X$  MCS). Anche per la sequenza del 1997 i meccanismi focali (Milano et al., 1999), indicano movimenti distensivi, sebbene in questo caso l'orientamento dell'asse di estensione risulti in direzione NO-SE.

Le sequenze a bassa energia del 1990 e 1997 non interessano l'intero segmento di faglia, ma si impostano all'incrocio tra le faglie e/o prolungamenti di

faglie a direzione NO-SE con le principali strutture trasversali a direzione NE-SO, laddove la coesione delle rocce è probabilmente ridotta.

La vista in sezione SO-NE della distribuzione ipocentrale ottenuta dall'applicazione del MMS agli eventi della sequenza del 1990 (Fig. 4) mostra inoltre che la maggior parte degli eventi si dispone lungo un piano sub-verticale; a partire da quest'ultimo si notano, poi, a diverse profondità, anche altri raggruppamenti secondari che si propagano verso la superficie in direzione NE. Il quadro complessivo sembrerebbe quindi suggerire la coesistenza un sistema di faglie sintetiche ed antitetiche, i cui movimenti sono tra loro correlati.



**Fig. 4** - Risultato dell'applicazione del MMS alla sismicità del Beneventano 1990; sezione in direzione SO-NE

In conclusione, i risultati ottenuti dall'applicazione del Metodo della Miglior Stima (MMS; Bossu, 2000) alle distribuzioni ipocentrali relative a due sequenze sismiche di bassa energia che hanno interessato l'area compresa fra i monti del Matese ed il Sannio nel 1990 e nel 1997 hanno evidenziato significativi allineamenti nella distribuzione degli eventi sismici.

In particolare, per la sequenza del 1990 si osserva un allineamento principale in direzione appenninica NO-SE; mentre la distribuzione degli eventi relativi alla sequenza del 1997 evidenzia un allineamento degli epicentri in direzione NNE-SSO (Fig. 3).

Entrambe le sequenze si collocano laddove la coesione delle rocce è maggiormente ridotta, ovvero all'incrocio tra le faglie a direzione NO-SE, responsabili di forti terremoti ( $M > 5.5$ ), con le principali strutture trasversali a direzione NE-SO.

La sismicità legata sia alle strutture a direzione appenninica sia a quelle antiappenniniche è consistente con movimenti di tipo normale. Il quadro deformativo risulta, quindi, caratterizzato da due direzioni di estensione tra loro ortogonali e suggerisce processi di "longitudinal extension" (Oldow et., 1993) lungo la catena appenninica.

## BIBLIOGRAFIA

- Alessio G., Esposito E., Gorini A. et al.; 1995: Detailed study of the Potentino seismic zone in the Southern Apennines, Italy. *Tectonophysics*, 250, 113-134.
- Alessio G., Gorini A., Vilardo G. and Iannaccone G.; 1996: Low energy sequences in areas with seismic potential: Benevento (Southern Apennines), April 1990. V. Shenk (ed.), *Earthquake Hazard and Risk*, Kluwer Ac. Publ. (N), 3-16.
- Amato, A. and Montone P.; 1997: Present-day stress field and active tectonics in southern peninsular Italy, *Geoph.J. Int.*, 130, 519-534.
- Asanuma H, M. Ishimoto, R.H. Jones, W.S. Phillips, and H. Niitsuma; 2001: A Variation of the Collapsing Method to Delineate Structures Inside a Microseismic Cloud; *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 1, p. 154 – 160.
- Bossu R.; 2000: A simple approach to constrain the position and the geometry of seismogenic structures: Application to Karthala volcano (Grande Comores Island, Mozambique Channel), *Journal of Seismology*, 4, 41 – 48,.
- Cinque A., Patacca E., Scandone P. and Tozzi M.; 1993: Quarternary kinematic evolution of the Southern Apennines. Relationship between surface geological features and deep lithospheric structures. *Annali di Geofisica*, 36 (2), 249-260.
- CPTI Gruppo di Lavoro; 1999: *Catálogo Parametrico dei Terremoti Italiani*, GNDT-ING-SGA-SSN (Editori), pp.92, Editrice Compositori, Bologna, 1999. Disponibile anche al sito: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/CPTI>.
- Dogliani, C., P. Harabaglia, G. Martinelli, F. Mongelli, G. Zito; 1996: A geodynamic model of the Southern Apennines accretionary prism. *Terra Nova* 8, 540-547.
- Federici P., Di Maro R., Marchetti A., Cocco M.; 1992: Analisi della sismicità dell'area del Sannio-Matese negli anni 1991-1992. *Proc. 11° Natl. Assembly G.N.G.T.S. - Roma*, 389-404.
- Ferranti, L., Oldow, J. S. and M. Sacchi; 1996: Pre-Quaternary orogen-parallel extension in the Southern Apennine belt, Italy. *Tectonophysics*, 260, 325-347.
- Fehler M., House L. and Kaieda H.; 1987: Determining planes along which earthquakes occur: Method and application to earthquakes accompanying hydraulic fracturing, *J. Geophys. Res.* 92 (B9), p.9407 – 9414.
- Frepoli, A. and Amato, A.; 1997: Contemporaneous extension and compression in the northern Apennines from earthquake fault plane solution, *Geophys. J. Int.*, 129, 368-388.
- Frepoli, A. and Amato, A.; 2000: Spatial variation in stresses in peninsular Italy and Sicily from background seismicity, *Tectonophysics*, 317, 109-124.
- Frohlich C.; 1979: An efficient method for joint hypocenter determination for large groups of earthquakes, *Comput. Geosci.* 5, p.387-389.
- Gasparini, C., G. Iannaccone and R. Scarpa; 1985: Fault-plane solutions and seismicity of the Italian peninsula. *Tectonophysics*, 117, 59-78.
- Hippolyte, J.C., J. Angelier and F. Roure; 1994: A major geodynamic change revealed by Quaternary stress patterns in the Southern Apennines (Italy). *Tectonophysics*, 230, 199-210.
- Jones R. H., Stewart R. C.; 1997: A method for determining significant structures in a cloud of earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 102, B4, 8245 – 8254.
- Milano G., Digiovambattista R. and Alessio G.; 1999: Earthquake swarms in the Southern Apennines chain (Italy): the 1997 seismic sequence in the Sannio-Matese mountains. *Tectonophysics*, 306: 57-78.
- Oldow, J. S., B. D'Argenio, L. Ferranti, G. Pappone, E. Marsella and M. Sacchi; 1993: Large-scale longitudinal extension in the southern Apennines contractional belt, Italy. *Geology*, 21, 1123-1126.
- Ortolani, F., S. Pagliuca, E. Pepe, M. Schiattarella and R. M. Toccaceli; 1992: Active tectonics in the Southern Apennines: relationships between cover geometries and basement structure. A hypothesis for a geodynamic model. IGCP No. 276, Siena 1992, vol. 5, 413-419.
- Patacca, E., Scandone P. and C. Meletti; 1997, *Variazioni di regime tettonico nell'Appennino meridionale durante il Quaternario*. AIQUA, annual meeting abstracts, Parma 1997.
- Sorgi, C., B. Deffontaines, J. C. Hippolyte and J. P. Cadet; 1998; An integrated analysis of transverse structures in the northern Apennines, Italy. *Geomorphology*, 25, 193-206.
- Valensise, G., Pantosti D., D' Addezio G., Cinti F. R. and L. Cucci; 1993, *L'identificazione e la caratterizzazione di faglie sismogenetiche nell'Appennino centro-meridionale e nell'Arco calabro: nuovi risultati e ipotesi interpretative*. Atti del XII NGGTS, Roma 1993, 331-342.
- Valensise G. and Pantosti D.; 2001: The investigation of potential earthquakes sources in peninsular Italy: A review. *J. of Seismology* 5, 287-306.

Valensise and Pantosti (eds); 2001: Database of Potential Sources for Earthquakes Larger than M 5.5 in Italy. Annali di Geofisica, Suppl. to vol.44(4), 180 pp., with CD-ROM.

Vilardo G., Terranova C., Bronzino G., Giordano S., Ventura G., Alessio G., Gabriele M., Mainolfi R., Pagliuca E., Veneruso M.; 2001: SISCam: Sistema Informativo Sismotettonico della Regione Campania. URL: <http://ipf.ov.ingv.it/siscam/>

Westaway R.; 1993: Quaternary Uplift of Southern Italy. J. Geophys. Res., 98, B12, 21, 741-21, 772.