

di fasi P e S di terremoti locali registrati a stazioni sismiche di array densi alla superficie rappresenta uno dei più robusti metodi di indagine strutturale profonda. Lo studio può essere eseguito sia utilizzando gli aftershocks di eventi di maggior magnitudo, sia la sismicità di fondo di una zona sismica permettendo, quindi, di ottenere informazioni preziose con largo anticipo rispetto ad un futuro forte terremoto. L'analisi congiunta della sismicità, aftershocks o background seismicity, e delle immagini tomografiche ricavate permette di chiarire la relazione fra strutture profonde e sismogenesi.

Applicazioni: Oltre ad un riesame accurato della zona sismica Irpina, lo studio in questo anno si è concentrato in due zone:

- El Asnam: regione sismica dell'Algeria interessata da un evento di $M_s=7.3$ nel 1980.

- zona del Benevento-Matese: area sismica dell'Appennino meridionale dove sono avvenuti numerosi forti terremoti nel passato e sede attualmente di un gap sismico.

È, inoltre, in fase di avvio lo studio tomografico dell'area di Kozani (Grecia) interessata nel Maggio 1995 da un evento di magnitudo 6.6.

17. Sismologia delle aree vulcaniche.

Un filone di ricerca portato avanti nel 1995 riguarda gli studi simologici di zone vulcaniche. Una particolare attenzione è stata posta alla comprensione dei processi attivi ai Colli Albani, in continuità con i lavori svolti da un folto gruppo dell' U.O. RMS negli ultimi anni.

Obiettivi: I principali obiettivi perseguiti riguardano la comprensione dell'assetto strutturale profondo dei vulcani Quaternari e attivi della regione italiana e dei processi in atto. L'applicazione di tecniche multidisciplinari ha consentito di individuare processi legati ad attività magmatica al di sotto dei Colli Albani.

Metodi: Le tecniche applicate per lo studio dei vulcani variano da quelle tomografiche con sorgenti naturali (telesismi, terremoti locali) a quelle di deformazione verticale del suolo, tramite livellazioni geodetiche.

Nel corso dell'anno sono stati conclusi gli studi tomografici con terremoti locali del complesso vulcanico vulsino e dell'isola di Vulcano (in collaborazione con altri gruppi anche esterni all'I.N.G.). Una particolare attenzione è stata rivolta alla comprensione del vulcano dei Colli Albani permettendo di raggiungere una conoscenza di dettaglio.

Recentemente, ed in naturale proseguimento nell'anno 1996, è stata iniziata una collaborazione scientifica internazionale mirata alla definizione della struttura profonda del Vesuvio. Tale progetto, che vede la collaborazione di partners quali UMR Geosciences Azur di Nizza, Osservatorio Vesuviano, Università di Napoli, si articolerà nella partecipazione all'esperimento di tomografia sismica 3-D del Vesuvio che si svolgerà nel Giugno-Luglio 1996, e in un esperimento con un array a larga

banda centrato sul Vesuvio in linea con gli esperimenti dei transetti telesismici (progetto CEE, n. EV5V-CT94-0464).

18. *Accordo internazionale Eurobull*

L'accordo internazionale denominato "EUROBULL" iniziato nel 1995, ha come obiettivo la compilazione di un bollettino europeo completo e di alta qualità che possa essere usato sia come riferimento per la valutazione di bollettini prodotti da reti mondiali, sia per propositi scientifici. La Francia, l'Italia e la Svizzera hanno utilizzato i dati di circa dieci paesi applicando procedure specifiche diverse di associazione e localizzazione degli eventi.

Le procedure già in uso presso l'Istituto Nazionale di Geofisica per il bollettino italiano, hanno costituito la base per la compilazione del bollettino europeo prodotto dall'Italia. Il criterio seguito nel modificare le procedure è stato quello di renderle automatiche il più possibile in modo da limitare al minimo l'intervento dell'operatore. Sono in via di ultimazione una serie di procedure per il controllo automatico della qualità del bollettino (dispersione dei valori delle magnitudo, valutazione degli errori di localizzazione del tempo origine e dei residui medi).

Lavori non ancora pubblicati:

- Basili A., Cantore L., Cocco M., Frepoli A., Margheriti L., Nostro C., Selvaggi G., (1995). A microearthquake study of the June 12, 1995, Rome seismic sequence. Sottomesso a *Annali di Geofisica*
- Chiarabba C., and A. Amato, Upper crustal structure of the Benevento Area (southern Italy): fault heterogeneities and potential for large earthquakes, sottomesso a *Geophysical Journal International*.
- Colombo, D., G.B. Cimini, and, R. de Franco, (1995). Three-dimensional velocity structure of the upper mantle beneath Costa Rica from a teleseismic tomography study., Submitted to *Geophysical J. Int.*
- Console, R. and R. Rosini (1996). Non double-couple microearthquakes in the geothermal field of Larderello, Central Italy. Sottomesso a *Tectonophysics*.
- Console, R., R. Di Giovambattista, A. Di Sanza, P. Favali and G. Smriglio. MCJHD: a new algorithm for Multi-Constrained Joint Hypocentre Determination. Sottomesso
- Console, R., R. Di Giovambattista, A. Di Sanza, P. Favali and G. Smriglio. The role of constraints on Joint Hypocentre Determination. Sottomesso
- Di Giovambattista, R. and S. Barba. An estimate of hypocenter location accuracy in large network: the Italian case. Sottomesso
- Frepoli A., G. Selvaggi, C. Chiarabba, and A. Amato, (1995). State of Stress in the Southern Tyrrhenian subduction zone from fault plane solution. *Geophys. Journ. Int.* In stampa.
- Hatzfeld, D., V. Karakostas, M. Ziazia, G. Selvaggi, S. Leborgne, C. Berge,, D. Diagourtas, I. Kassaras, K. Macropoulos, R. Guiguet, A. Paul, C. Papaioannu, R. Azzara, M. Dibona, S. Baccheschi, P. Bernard. The Kozani-Grevenà (greece) earthquake of May 13, 1995, revisited from a detailed seimological study. Sottomesso a *Bull. Seism. Soc. Am.*
- Margheriti L., Nostro C., Cocco M. and Amato A. Seismic anisotropy beneath the northern Apennines (Italy) and its tectonic implications. Sottomesso al *J.R.L.*
- Milana, G., S. Barba, E. Del Pezzo, E. Zambonelli. Site response from ambient noise measurements: new perspectives from an array study in Central Italy, accettato su *B.S.S.A.*
- Pino N.A., Vilardo G., Chiarabba C. & Ferrucci F.. Seismological evidence for a shallow intrusive body under Vulcano island (aeolian Archipelago, southern Tyrrhenian sea), sottomesso a *JGR*.

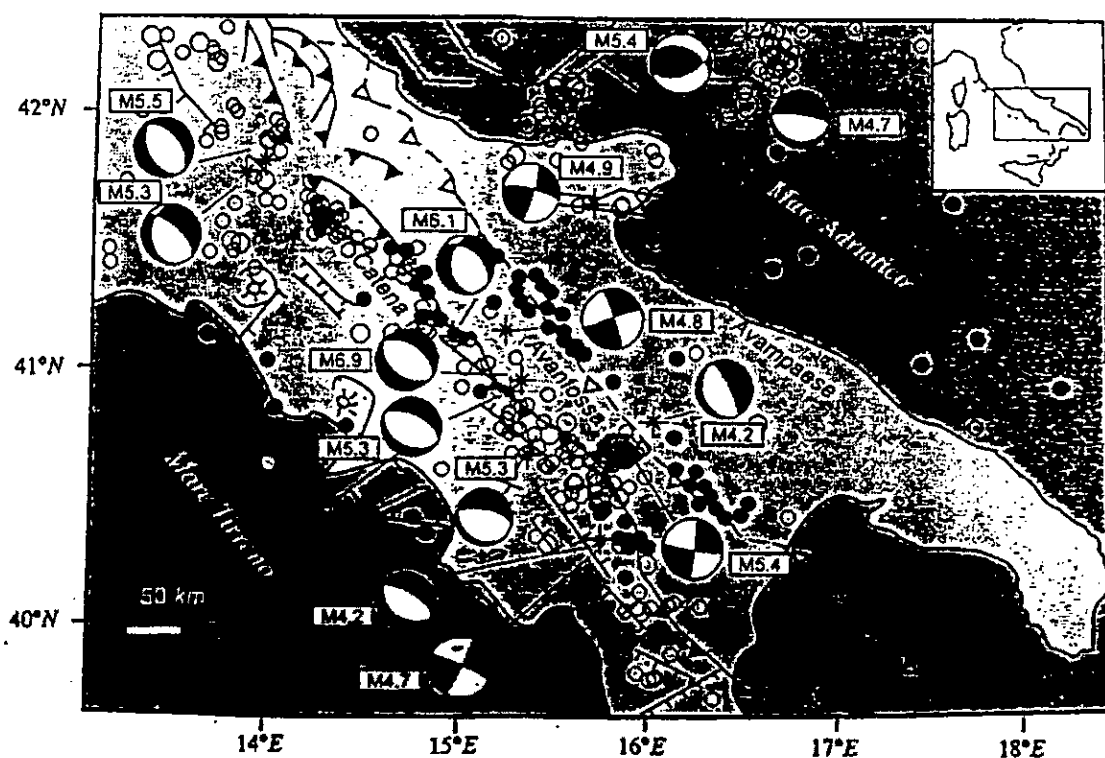
UNITÀ ORGANICA SISMOLOGIA E FISICA DELL'INTERNO DELLA TERRA (SFIT)

Introduzione

Le linee di ricerca sviluppate in questa U.O., che qui di seguito si analizzeranno sinteticamente, si riferiscono a tematiche che spaziano dai modelli tettonici globali allo studio di dettaglio delle faglie e della propagazione delle onde sismiche.

Più in particolare, tali attività si articolano secondo i seguenti orientamenti di ricerca:

- Tettonica Recente e Paleosismicità
- Campo di stress attivo in Italia
- Struttura della litosfera in Italia e nel Mediterraneo
- Indagini geofisiche in mare per lo studio dell'evoluzione spazio-temporale di strutture sismogenetiche
- Distribuzione spazio-temporale dei terremoti in Italia
- Macrozonazione sismica del territorio nazionale
- La risposta sismica delle aree urbane
- Modellazione numerica delle forme d'onda su piccola scala
- Ricerche in Sismologia Storica
- Tettonica globale, paleogeografia e modellistica dei margini attivi



1. Tettonica Recente e Paleosismicità

Questo filone di ricerca è proseguito lungo le linee già intraprese negli scorsi anni, contribuendo a consolidare il ruolo-guida che l'Istituto ha assunto anche a livello internazionale per quanto riguarda l'approccio geologico allo studio delle faglie sismogenetiche. Le attività svolte durante il periodo in oggetto possono essere suddivise in cinque linee principali:

- (1) Ricerche originali sul territorio nazionale;
- (2) Attività di coordinamento delle ricerche e di elaborazione dei risultati;
- (3) Collaborazioni con enti di ricerca esteri;
- (4) Organizzazione e partecipazione a convegni;
- (5) Attività di tirocinio.

1.1 Ricerche originali sul territorio nazionale

Queste ricerche hanno avuto come fine principale quello di fornire nuovi dati e interpretazioni in vista della compilazione e pubblicazione del *Catalogo delle Faglie Sismogenetiche Italiane* da affiancare al *Catalogo dei Forti Terremoti Italiani* come strumento di base offerto dall'Istituto alla comunità sismologica nazionale (si veda il punto successivo). La redazione di questo catalogo si basa sull'ulteriore sviluppo e affinamento del Modello Sismogenetico dell'Appennino centro-meridionale di cui sono state pubblicate versioni progressivamente più complete e perfezionate a partire dal 1988.

Come nel passato, le ricerche per l'arricchimento del *Catalogo delle Faglie Sismogenetiche* hanno seguito due linee principali: quella indirizzata allo studio di faglie *evidenti* o *nascoste*, che annovera tra i suoi metodi la geomorfologia della zona di faglia e delle aree limitrofe, la microtopografia, l'apertura di trincee esplorative; e quella che punta a studiare le faglie *cieche* attraverso l'analisi e la modellazione dei loro effetti di deformazione areale, accumulati nella geologia recente, e della parallela evoluzione del paesaggio. Lo sviluppo di tali linee di ricerca ha reso necessario l'utilizzo di cartografia di base del territorio nazionale, di foto aeree, di immagini riprese da satellite, di *hardware* e *software* specifici per l'elaborazione grafica dei dati raccolti anche direttamente sul terreno.

In particolare sono stati portati a conclusione progetti di ricerca riguardanti le faglie di Ovindoli-Pezza e del Fucino, nell'Abruzzo centrale, e la faglia di Gioia Tauro, nella Calabria meridionale; sono in corso di svolgimento progetti riguardanti le faglie di Castrovillari-Frascineto e della Valle del Crati, nella Calabria settentrionale, della Piana di Bojano, nel Molise, e della Val d'Agri, al confine Campania-Basilicata; e infine sono stati attivati progetti di ricerca volti alla definizione delle altre strutture sismogenetiche abruzzesi e al riconoscimento e localizzazione di strutture sismogenetiche della Sicilia orientale. La figura allegata riassume le aree in cui sono state svolte indagini nel periodo considerato e i risultati conseguiti.

1.2 Attività di coordinamento delle ricerche e di elaborazione dei risultati.

Tali attività sono state rivolte al proseguimento dei due progetti sopra menzionati, riguardanti rispettivamente il *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia*, e ricerche collegate, e il *Catalogo delle Faglie Sismogenetiche Italiane*. Entrambi i

progetti vedono il coinvolgimento e il coordinamento sia di personale dell' I.N.G. sia di personale esterno.

Nell'estate del 1995, come risultato di queste attività è stato pubblicato il nuovo e innovativo *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia* che è stato seguito sia nella fase di indirizzo delle ricerche da sviluppare sia nella fase di progettazione editoriale e coordinamento amministrativo. Per quanto riguarda la prima fase, è importante sottolineare che in questo periodo sono stati stretti i legami naturali tra la ricerca storica e quella paleosismologica, particolarmente per quei settori del territorio dove il *record* storico appare più lacunoso e ambiguo. L'esperienza così sviluppata, praticamente unica al mondo, si configura come un evento in grado di rivoluzionare il ruolo della ricerca sui terremoti del passato per le valutazioni di pericolosità sismica.

Nei primi mesi del 1994 è stato formalizzato l'avvio della raccolta ed elaborazione dati in vista della pubblicazione del primo *Catalogo delle Faglie Sismogenetiche Italiane*, che dovrebbe divenire uno strumento permanente - anche se naturalmente soggetto a periodiche integrazioni e revisioni - a disposizione di coloro che valutano la pericolosità sismica del territorio e il rischio sismico in aree urbane. Il progetto prevede la creazione di carte ed elaborati tematici e l'ideazione di un opportuno formato di pubblicazione, che sarà del tipo multimediale (stampa/supporto informatico).

Sono state inoltre avviate ricerche nel quadro di un contratto CEE denominato "SCENARIO" (n. EV5V-CT94-0494) che ha come obiettivo l'elaborazione di scenari deterministici di scuotimento per grandi terremoti nella regione compresa tra la provincia di Reggio Calabria e la Sicilia orientale.

1.3 Collaborazioni con enti di ricerca esteri.

Nel periodo in oggetto si è avuta ulteriore conferma del fatto che le attività svolte nell'ambito del Progetto Sismicità e Tettonica Recente godono di largo consenso internazionale e che l'I.N.G. rappresenta un punto di riferimento per queste ricerche nell'area mediterranea. Allo stesso tempo queste collaborazioni rappresentano un'importante occasione di sviluppo di nuove conoscenze che possono essere riversate nella ricerca sulla sismicità italiana. Le collaborazioni hanno riguardato sia il soggiorno di ricercatori stranieri presso l'I.N.G. e la loro partecipazione alle attività di ricerca che vi si svolgono, sia il soggiorno di ricercatori dell'Istituto presso istituzioni straniere. In entrambi i casi l'obiettivo principale è lo sviluppo della ricerca paleosismologica di base per la stima del potenziale sismogenetico delle faglie attive nei paesi con i quali avviene lo scambio di ricercatori. In particolare, durante il periodo in oggetto, scambi di visite e collaborazioni sono state effettuate con l'Università di California, l'U.S. Geological Survey di Menlo Park, l'Université di Cergy-Pontoise (Francia), l'International Institute of Earthquake Engineering and Seismology di Tehran (Iran), l'Università di Leeds (Inghilterra), l'Università di Salonicco (Grecia) e l'Università di Barcellona (Spagna).

1.4 Organizzazione e partecipazione a convegni.

Nel periodo in oggetto i ricercatori hanno preso parte a numerosi convegni internazionali, talora rivestendo ruoli organizzativi. Si ricordano tra gli altri: *European Geophysical Society*, Amburgo (aprile 1995); *European Union of Geosciences*, Strasburgo (aprile 1995); *International Union of Geodesy and Geophysics*, Boulder - Denver, Colorado (luglio 1995). Va ricordata in particolare la *International*

School of Solid Earth Geophysics, 11th Course: "Active Faulting Studies for Seismic Hazard Assessment", organizzata a Erice alla fine di settembre 1995 e finalizzata a una verifica dello stato delle conoscenze sulle tematiche su cui l'I.N.G. opera a partire dal 1987.

1.5 Attività di tirocinio.

Le collaborazioni con l'esterno e in particolare con la comunità scientifica internazionale si sono concretizzate nel periodo in questione in una serie di *stages* di studio e formazione di giovani ricercatori provenienti da Francia, Iran, Turchia, Algeria e Spagna presso l'I.N.G. per periodi variabili tra le 2 settimane e i 4 mesi. Durante la loro permanenza, questi ospiti hanno avuto l'opportunità sia di usufruire delle strutture dell'I.N.G. (biblioteca, computers, strumentazione, ecc.) per la costruzione di un *background* teorico-tecnico sulle discipline riguardanti la tettonica attiva, sia di partecipare alle campagne sul terreno per acquisire anche cognizioni operative.

A partire dal marzo 1995 e per circa 10 mesi è stata attribuita una borsa di studio del C.N.R.-G.N.V.

Nel giugno 1995, nell'ambito del Programma ERASMUS della Comunità Europea (ICP-94-G-4008/07), è stato dato un contributo alla "Summer School on Structural Geology and Neotectonics with Emphasis on Paleoseismology" (tenutasi a Salonicco) con alcune conferenze su tematiche paleosismologiche e una lezione operativa sul campo, riguardante lo studio di una trincea per indagini paleosismologiche.

Infine, nel periodo in oggetto e nell'ambito delle attività, sono state anche seguite e completate numerose tesi di laurea su diverse tematiche della paleosismologia, geomorfologia e geomorfologia quantitativa, con applicazioni a diverse aree italiane. Tematiche analoghe sono affrontate in alcune tesi tuttora in corso.

2. Definizione del Campo di Stress Attivo in Italia

Presso l'Istituto Nazionale di Geofisica è iniziato nel 1992 un progetto di ricerca mirato alla definizione del campo di stress attivo in Italia. Tale progetto si basa sull'acquisizione di dati di deformazione (analisi di breakout) lungo le perforazioni profonde, sull'analisi dei meccanismi focali e sulla verifica, in campagna, di strutture geologiche recenti.

2.1 Analisi di breakout

L'analisi dei breakout è una delle tecniche con le maggiori potenzialità per fornire informazioni sul campo di stress attuale. Tale metodologia permette di studiare il campo di stress in aree asismiche e in un intervallo di profondità della crosta (i primi 5 km) dove le informazioni deducibili dai meccanismi focali sono rare.

Numerosi studi hanno dimostrato che le deformazioni della sezione del pozzo sono dovute a processi di franamento (o breakout) della parete del foro, intendendo con questo termine l'effetto delle rotture di taglio, diametralmente opposte, che si creano nelle pareti del foro. L'asse maggiore dell'ovalizzazione risultante è parallelo alla direzione dello sforzo minimo orizzontale (S_{Hmin}), mentre la direzione ortogonale indica lo sforzo massimo orizzontale (S_{Hmax}). Il confronto di queste direzioni con i meccanismi focali dei terremoti crostali (vedi par. successivo) consente di determinare il regime di stress attivo e le direzioni del tensore di stress.

Le aree studiate finora sono vincolate dalla distribuzione areale dei pozzi profondi effettuati dalle principali compagnie petrolifere (Agip, Enel e Lasmo Int.). Fino ad oggi sono state determinate le condizioni di stress nell'Appennino meridionale e nell'area geotermica toско-laziale.

Nel 1995 sono stati analizzati i pozzi profondi della Calabria, sia a mare che in terra, per un totale di 12 pozzi (Progetto ING-AGIP).

Sono stati analizzati oltre 60 pozzi lungo la costa adriatica (sia a terra che in mare) da Vasto ad Ancona (Progetto ING-AGIP). I primi risultati sono stati presentati all'American Geophysical Union a San Francisco.

2.2 Analisi di meccanismi focali

A partire dal 1994 è stata avviata un'analisi sistematica dei meccanismi focali dei terremoti italiani avvenuti nel periodo 1988-1995. In totale sono stati analizzati circa 550 terremoti crostali con Magnitudo compresa tra 2.6 e 4.8.

Per ogni evento sono stati letti i tempi di arrivo delle fasi P e, dove è stato possibile, sulle nuove forme d'onda digitali relative agli eventi del 1995 i tempi di arrivo delle fasi S.

Gli eventi selezionati sono stati rilocalizzati con un modello di velocità a gradiente e per ognuno di essi è stato calcolato il meccanismo focale.

Nel 1995 sono stati rilocalizzati gli eventi distribuiti nelle Alpi, nell'Appennino meridionale e in Sicilia; precedentemente erano stati rilocalizzati gli eventi dell'Appennino centro-settentrionale.

I risultati relativi all'Appennino settentrionale sono stati presentati al 14° Convegno di Geofisica della Terra Solida ed al Convegno American Geophysical Union di San Francisco.

Sullo studio dello stress in situ e della sismicità è in corso una tesi di laurea presso l'ING.

3. La Struttura della Litosfera in Italia e nel Mediterraneo.

Gli studi tomografici nell'area del Mediterraneo centrale sono stati il tema di un Progetto finanziato dalla CEE (contratto n. EV5V-CT93-0304) "Southern Europe Network for Analysis of Seismic Data" iniziato nel 1994 nell'ambito di una collaborazione tra l'Istituto Nazionale di Geofisica, l'Osservatorio Nazionale di Atene (Grecia) e l'Istituto Geografico Nacional (Spagna).

Nel corso del 1995 sono stati sviluppati studi tomografici per la struttura crostale della regione italiana e per il Mediterraneo centrale (successivamente esteso per le zone in cui sono presenti terremoti profondi fino a 300 km di profondità).

In collaborazione con il National Observatory of Athen è stata analizzata la struttura crostale della Grecia e dell'area ionico-egaea evidenziando risultati estremamente interessanti che sono in via di pubblicazione.

In collaborazione con il Geografico Nacional di Madrid è stata analizzata l'area spagnola.

Tali studi sono rivolti a quella parte della struttura terrestre, cioè la crosta, nella quale si concentra maggiormente la sismicità, ed hanno quindi lo scopo di migliorare le conoscenze della geodinamica della zona in studio e di rendere ancora più affidabile la localizzazione degli eventi sismici.

La tecnica utilizzata è basata sull'algoritmo di inversione originariamente sviluppato da Thurber con il raytracing di Prothero.

Gli studi di tomografia locale producono immagini tridimensionali della struttura terrestre, che rappresentano i valori della velocità di propagazione delle onde sismiche.

Sono stati prodotti grafici a colori con viste in sezione e tridimensionali delle aree studiate.

In collaborazione con il Prof. Muawia Barazangi e il Dr. Dogan Seber dell'Institute for the Study of the Continents, Department of Earth Sciences, Cornell University, Ithaca (New York State, USA), si è studiata la propagazione delle fasi regionali, ottenendo informazioni sulle proprietà elastiche e anelastiche del mantello superiore.

L'efficienza della propagazione delle onde sismiche su scala regionale (Pn, Sn, Lg, fasi profonde) di alta frequenza (≈ 1 Hz) registrate nell'area italiana, e la loro attenuazione, hanno importanti implicazioni tettoniche. In particolare le onde di taglio Sn sono fortemente attenuate nelle loro componenti di alta frequenza al passaggio nell'astenosfera (la cosiddetta *Low Velocity Zone*) per la presenza di materiale parzialmente fuso. Per questa loro caratteristica esse rappresentano un importante strumento di indagine per lo studio di eterogeneità laterali delle proprietà reologiche nel mantello superiore.

Per la prima volta in Italia si è affrontato lo studio dell'attenuazione delle onde sismiche su scala regionale. Questo studio è stato sviluppato attraverso l'analisi qualitativa delle caratteristiche di frequenza e di ampiezza del segnale sismico, in una prima fase, e poi, in una seconda fase, mediante l'inversione dei tempi di arrivo delle onde Pn con tecniche tomografiche, le quali consentono di avere una immagine delle variazioni di velocità delle onde sismiche al disotto della Moho. L'inversione tomografica è stata effettuata in collaborazione con il Dr. Thomas Hearn della New Mexico State University di Las Cruces (USA).

La stima del fattore di qualità per le fasi compressive Pn ha infine fornito una valutazione quantitativa della dissipazione delle onde sismiche nel mantello.

Mediante la tomografia sismica del mantello superiore sono emerse chiare evidenze di un elevato livello di anisotropia della velocità delle onde sismiche nel mantello superiore in Italia: l'aspetto più significativo è che la direzione di massima velocità ha orientamento NW-SE, parallelo all'asse della catena appenninica. L'orientazione della massima velocità delle onde sismiche dà indicazioni sulla direzione del flusso astenosferico.

I risultati finora ottenuti con le diverse tecniche sono consistenti ed evidenziano chiaramente l'esistenza, nel mantello litosferico, di una netta discontinuità al margine adriatico della penisola italiana, con bassi valori di velocità e alta attenuazione al disotto della catena appenninica e del bacino tirrenico, indicativi dell'esistenza di una zona termicamente anomala nel mantello superiore.

4. Indagini Geofisiche in Mare per lo Studio dell'evoluzione Spazio-Temporale di Strutture Sismogenetiche

L'Istituto Nazionale di Geofisica, in collaborazione con l'Istituto per la Geologia Marina di Bologna (C.N.R.) e con il Centro Sismologico di Tirana (Albania), è impegnato dal 1991 in attività di prospezione geofisica in mare mediante sismica a riflessione multicanale. Tale attività ha come scopo l'acquisizione di dati che consentano l'individuazione e la caratterizzazione geodinamica a scala regionale di strutture tettoniche in aree marine sismicamente attive. L'area in esame è il bacino Adriatico centro-meridionale.

Il settore crostale del bacino adriatico, indicato in letteratura come avampaese stabile delle catene montuose periadriatiche di età cenozoica (Appennini, Alpi Meridionali, Dinaridi, Ellenidi) è stato interessato negli ultimi anni da alcune sequenze sismiche, con magnitudo fino a 5.3, localizzate al largo del promontorio del Gargano. La sismicità è distribuita lungo due ampie fasce di deformazione già identificate come Faglia Sud-garganica e Faglia delle Tremiti. In particolare, la Faglia Sud-garganica rappresenta il prolungamento in mare della Faglia di Mattinata, importante lineamento E-W a carattere trascorrente identificato nel settore meridionale del Promontorio del Gargano (FG) e probabilmente responsabile dell'attività sismica che ha interessato quest'area in tempi storici e anche molto di recente (attività sismica dell'agosto-settembre 1995).

A partire dal 1991 alcune migliaia di chilometri di profili sismici sono stati acquisiti, elaborati e interpretati allo scopo di identificare strutture sismogenetiche e di definire la loro evoluzione spazio-temporale. L'acquisizione di profili sismici in acque territoriali albanesi e in acque internazionali, ha consentito di raccordare le strutture tettoniche presenti al largo del Gargano con quelle individuate al margine orientale del bacino, permettendo quindi di chiarire i rapporti cinematici tra i sistemi di faglia esistenti nell'area adriatica, nonché l'interpretazione dell'assetto strutturale del bacino adriatico, in gran parte ereditato da ampi piegamenti di età mesozoica.

I dati acquisiti finora sono del tutto originali e permettono di delineare un quadro cinematico coerente di un'area importante per la comprensione dell'evoluzione geodinamica della regione centro-mediterranea. Nel 1995 è stata completata l'elaborazione di tutti i dati finora acquisiti. I risultati sono stati presentati a numerosi convegni italiani e internazionali.

5. Distribuzione Spazio-Temporale dei Terremoti in Italia

Alcuni interessanti comportamenti dell'attività sismica nella sua evoluzione spazio-temporale, quali quelli conosciuti come attività premonitrice (*foreshocks*), serie di repliche (*aftershocks*), sciame (*swarms*), migrazioni di epicentri, quiescenze sismiche, correlazioni fra aree distinte, ecc., sono ritenute validi elementi ai fini della previsione dei terremoti. Nel loro complesso, tali particolari comportamenti vengono definiti con il termine *pattern* di sismicità.

Il filone di ricerche legato ai *pattern* di sismicità e alla loro applicazione ai fini di protezione civile si è finora sviluppato su due temi distinti: la valutazione della pericolosità in tempo reale, basata sulla determinazione della probabilità condizionata di eventi susseguenti a potenziali *foreshocks* (previsione a breve termine), e l'individuazione di quiescenze sismiche naturali, considerate elementi significativi per la previsione a medio termine.

Per quanto concerne il primo punto, è stata studiata la probabilità di occorrenza di terremoti futuri a partire dall'andamento temporale degli eventi sismici nell'immediato passato presentando i risultati in forma grafica.

A tal fine sono state isolate le sequenze *foreshock-mainshock* e *mainshock-aftershock* registrate dalla Rete Sismica Nazionale nel periodo 1975-1994. Sono state messe in evidenza differenze significative di comportamento tra diverse aree sismogenetiche.

Si ritiene che questo lavoro possa fornire un utile e significativo contributo al problema della previsione a breve termine applicabile a situazioni reali.

La ricerca sul primo tema fa parte degli argomenti trattati attraverso una borsa di studio per il progetto CEE "Time dependent seismic hazard estimate based on multiparameter geophysical observatory system" (Contratto n° EV5V-CT94-0494). Dal primo semestre '95 alcuni aspetti di questo tema di ricerca, relativi tra l'altro all'individuazione di una legge di distribuzione della magnitudo dei *foreshock* e degli *aftershock* in Italia e in California, vengono trattati nell'ambito di una collaborazione con ricercatori dell'U.S. Geological Survey di Pasadena. Tale collaborazione mira a una migliore comprensione dei differenti processi che sono alla base della generazione di questo tipo di eventi sismici.

Per quanto riguarda il secondo tema, la collaborazione con il Prof. Max Wyss dell'Università dell'Alaska, iniziata nel 1993 e attuata attraverso alcune visite del medesimo presso l'I.N.G., ha consentito la messa a punto di un pacchetto di programmi per la distinzione fra variazioni naturali e fittizie del tasso di sismicità. Interessanti risultati sono emersi attraverso l'applicazione di questi codici di calcolo alla sismicità italiana. Nel primo semestre 1995 è stato installato, in occasione della più recente visita presso l'I.N.G. del Prof. Wyss, un nuovo *software* che permette, tramite una tecnica di visualizzazione basata sul pacchetto grafico "Matlab", di investigare la stabilità e le variazioni del tasso di sismicità nei cataloghi sismici, sia in funzione del tempo sia dello spazio. Tale metodologia ha migliorato notevolmente la risoluzione di potenziali anomalie, evitando di definire arbitrariamente i volumi crostali in studio.

6. Macrozonazione Sismica del Territorio Nazionale

L'I.N.G. possiede fondamentali strumenti sismologici di base per la valutazione delle caratteristiche sismiche del territorio italiano. Un gruppo di ricercatori si sta occupando da tempo dell'elaborazione e della redazione di mappe tematiche degli effetti dei terremoti sul territorio italiano, utilizzabili come strumento di base per lo studio della pericolosità sismica e per la classificazione del territorio nazionale.

Si è fatto uso dei dati ricavati dal Catalogo Sismico Nazionale (CSN) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e delle mappe delle isosisme esistenti in letteratura [I.N.G., 1983a; 1983b; 1988; *Postpischl*, 1985a]. Si sono raccolti altresì i dati sismici e macrosismici delle aree limitrofe ai confini italiani i cui risentimenti siano di interesse per questa ricerca. Come limite inferiore di intensità è stato scelto il VI grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (M.C.S.) perché corrispondente all'intensità più bassa per cui si producono effetti sui manufatti, la cui valutazione è meno soggettiva e quindi di maggior interesse per la stima della pericolosità. L'analisi riguarda circa 4000 terremoti a partire dall'anno 1 d.C., questa data è stata considerata perché anche per i primi secoli si hanno numerosi eventi ben documentati. Le mappe macrosismiche italiane utilizzate sono 528, relative a terremoti avvenuti tra il 1500 e il 1987; il 1500 è stato scelto come limite temporale inferiore perché a partire da tale data i campi macrosismici si possono ritenere ben definiti.

Il territorio italiano è stato suddiviso in 11 aree con caratteristiche sismotettoniche simili; per ognuna di esse, tramite la digitalizzazione delle mappe macrosismiche con intensità epicentrale I_0 maggiore o uguale al VI grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (M.C.S.), è stato calcolato, per isosisme omologhe, un modello medio di propagazione. L'Italia è stata quindi ulteriormente suddivisa in celle di dimensioni 0.1° per 0.1° ; per ciascuna di esse sono stati valutati, utilizzando le

isossime se disponibili o i modelli in mancanza di queste, alcuni parametri quali il numero degli effetti macrosismici risentiti per ogni grado di intensità, la massima intensità risentita e un indice sintetico C che tenesse conto cumulativamente di questi effetti. Ogni parametro è stato rappresentato mediante mappe che coprono l'intero territorio nazionale, allo scopo di ottenere in questo modo un quadro più completo del risentimento macrosismico e informazioni utilizzabili in problematiche connesse con lo studio della pericolosità sismica.

7. La Risposta Sismica delle Aree Urbane

7.1 Problematiche e metodologie

Nell'ambito delle ricerche sulla risposta sismica nelle aree urbane, particolare attenzione è stata rivolta alla città di Roma. Il valore storico e artistico della città ha inevitabilmente influito sulle tematiche di ricerca scaturite essenzialmente nell'ambito di rapporti di collaborazione con il Comune di Roma, la Regione Lazio e la Soprintendenza Archeologica.

Tali collaborazioni sono state sviluppate attraverso alcuni studi pilota sui rapporti tra sismicità e geologia del sito, applicati alle colonne Coclidi e al Colosseo, dai quali si è tratto spunto per la definizione di un programma di acquisizione di parametri geofisici *in situ* e il loro confronto con i caratteri stratigrafici e geotecnici.

Nell'area monumentale del Colosseo sono stati ricostruiti in dettaglio l'andamento e la geometria di una incisione olocenica colmata da sedimenti alluvionali inconsolidati. La posizione di tale elemento è risultata coincidere con la porzione della struttura dell' Anfiteatro che ha subito i maggiori danni in conseguenza di eventi sismici risentiti nella città. I risultati di modellazioni numeriche preliminari, effettuate nell'ambito di una collaborazione con alcuni ricercatori dell'Accademia Slovaca delle Scienze di Bratislava, sembrano avvalorare questa interessante ipotesi. Al fine di definire ulteriormente le geometrie della valle e di quantificare meglio i parametri geofisici da utilizzare per più sofisticate modellazioni, sono state effettuate, nell'area monumentale del Colosseo, due perforazioni che, oltre ad un controllo sui caratteri stratigrafici, hanno permesso l'esecuzione di misure *down-hole* e *cross-hole* e l'acquisizione di alcuni parametri geotecnici su campioni indisturbati, per un confronto con le velocità delle onde sismiche misurate *in situ*.

Di particolare importanza, per le implicazioni che ne derivano circa i massimi scuotimenti nella città di Roma, è risultato un esperimento su tavola vibrante portato a termine nell'ambito di una collaborazione con l'Istituto di Ingegneria Sismica dell'Università di Skopje (Macedonia). Lo scopo era verificare se gli evidenti danni che la Colonna Antonina mostra, in particolare la fratturazione di alcuni rocchi, potessero essere interpretati come l'effetto di uno (o alcuni) dei forti terremoti che, nelle epoche storiche, colpirono Roma.

L'esperimento trae origine da precedenti ricerche che attribuivano alla diversa natura dei terreni, su cui poggiano la Colonna Antonina e la Colonna Traiana, il diverso stato di conservazione dei due monumenti. Un'attenta ricostruzione della stratigrafia dell'area dove sono ubicate le due colonne aveva consentito di realizzare un modello 2-D delle geometrie sepolte dei diversi terreni e i relativi contrasti dell'impedenza sismica. Ne era risultato un quadro realistico e attendibile, che aveva fornito la frequenza di risonanza del pacco degli strati superficiali che, nel sito della Colonna Antonina, mostrano uno spessore di ≈ 60 m; misure strumentali sulla colonna avevano simultaneamente mostrato come la risonanza del monumento (pari

a 1.3 Hz) fosse molto prossima a quella stimata per i sedimenti superficiali (≈ 1.2 Hz). L'accoppiamento delle due risonanze avrebbe potuto esaltare il processo di amplificazione dell'eccitazione agente sulla Colonna Antonina, anche in concomitanza di sollecitazioni sismiche modeste al *bedrock*.

Il punto qualificante del progetto sviluppato in collaborazione con l'Università di Skopje, patrocinato dal nostro Ministero degli Affari Esteri, è stata la verifica, attraverso la costruzione in cemento di un modello della Colonna Antonina, in scala 1:6, delle capacità di danneggiamento di una accelerazione "realistica" agente alla base della colonna. In particolare, l'esperimento è consistito nell'eccitare il modello, sulla tavola vibrante del *Dynamic Test Laboratory* dell'Istituto di Ingegneria Sismica di Skopje, mediante opportune *time history* di eccitazione.

La caratterizzazione della risposta sismica al sito della colonna ha pilotato la selezione di un accelerogramma reale da utilizzarsi per eccitare la tavola vibrante. L'accelerogramma di Mercato San Severino, in occasione del terremoto Campano-Lucano del 1980, è risultato il più rappresentativo per simulare un *input* sismico su uno spessore di 60 m di sedimenti olocenici, prodotto a distanze intermedie da un forte terremoto nell'Appennino Centrale, con meccanismo di rottura di faglia normale. Il modello è stato eccitato ripetutamente utilizzando la forma d'onda della componente NS di questo terremoto, facendo crescere le ampiezze della sollecitazione dai valori più bassi attesi, fino ad un valore massimo di accelerazione pari a 150 gal. Per i valori più alti, la tavola vibrante è stata eccitata con diverse *time history* ottenute dallo stesso accelerogramma comprimendo o dilatando l'asse dei tempi, in modo da variarne il contenuto spettrale.

È interessante constatare che, per una accelerazione di picco di 150 gal, si è verificata, sul modello, una traslazione dei rocchi confrontabile con quella riscontrabile sul monumento. Si sono inoltre verificati anche fenomeni di fratturazione nei rocchi del modello stesso.

Anche se molti aspetti devono essere ancora compresi in dettaglio, questo esperimento ha mostrato come, per valori di accelerazione non necessariamente elevati, particolari meccanismi di interazione suolo-struttura possano provocare effetti di amplificazione del danno non facilmente prevedibili *a priori*.

8. Modellazione Numerica delle Forme d'onda su Piccola Scala

La variabilità delle forme d'onda del moto entro brevi distanze (dell'ordine dei 10-100 m) è legata alle rapide variazioni della geologia di superficie. La conoscenza dei dettagli delle geometrie sepolte e dei parametri elastici e anelastici dei terreni è un requisito indispensabile per interpretare le registrazioni strumentali, e per tentare di riprodurre numericamente le forme d'onda.

Nell'anno 1995, le ricerche hanno seguito due filoni principali:

- 1) mettere a punto metodologie di inversione che, utilizzando i sismogrammi acquisiti da array a piccola apertura, siano in grado di fornire la struttura, le velocità e il fattore di qualità dei terreni di superficie;

- 2) perfezionare le tecniche di simulazione numerica per generare dei sismogrammi sintetici che riproducano gli effetti prodotti sul moto del terreno dalle eterogeneità superficiali in 2 o 3 dimensioni.

Relativamente al primo punto, si sono sfruttate le potenzialità offerte dalle teorie sulla propagazione di segnali multimodali entro brevi distanze, caratterizzati da forti fenomeni di interferenza tra modi adiacenti non separati nel tempo. La costruzione

delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh che si propagano nelle coperture sedimentarie appare un approccio utilissimo (a basso costo) per stimare i parametri elastici ed anelastici che controllano le funzioni di trasferimento dei siti.

L'altra linea di ricerca affronta il tema della propagazione delle onde di volume in mezzi eterogenei. È stata messa a punto una procedura alle differenze finite in 2 dimensioni per onde SH che, unica nel suo genere, consente di includere nella modellazione irregolarità topografiche, incidenza obliqua e dissipazione dinamica.

La modellazione risulta particolarmente adatta allo sviluppo di animazioni grafiche, che consentono di visualizzare il ruolo giocato dalle interfacce nei processi di conversione di onde di volume in onde superficiali, e, più in generale, nei fenomeni di diffrazione, in funzione dell'angolo di incidenza e dei contrasti dell'impedenza sismica.

La disponibilità di dati sperimentali, in numero elevato e di buona qualità, ha consentito, in alcuni casi specifici, approcci ancora più complessi. Ad esempio, una ricerca basata sull'analisi delle registrazioni degli eventi sismici relativi alla sequenza di terremoti presso Loma Prieta, in collaborazione con la Southern California University, ha evidenziato la presenza di anomalie della polarizzazione delle componenti delle onde sismiche. Tali osservazioni sono state definite "risonanze direzionali". Il nome deriva dalla interpretazione del fenomeno come dovuto a riverberazioni negli strati superficiali della crosta con forte carattere direzionale. Il fenomeno è stato successivamente approfondito attraverso una campagna per la registrazione di dati sismici artificiali tramite un *array* a maglia molto stretta. Una volta acquisiti i dati sperimentali, sono state utilizzate raffinate tecniche tomografiche su piccola scala per ottenere informazioni circa la struttura della velocità nell'area di studio. Il modello ottenuto per le onde di compressione è stato esteso alle onde di taglio facendo ipotesi ragionevoli sul valore del rapporto di Poisson. Sono stati poi applicati metodi di simulazione delle onde sismiche basati su algoritmi alle differenze finite, messi a punto negli anni precedenti in collaborazione con John Vidale, dell'Università di Santa Cruz, California. Con questo modello a due dimensioni sono stati ottenuti sismogrammi in grado di riprodurre le caratteristiche più importanti presenti nei dati raccolti lungo un profilo di rifrazione di onde SH.

La conclusione più importante delle simulazioni 2-D è che l'attenuazione, la struttura della velocità e la topografia giocano un ruolo egualmente importante nella modellazione, e sono essenziali per riprodurre in modo adeguato le caratteristiche presenti nelle registrazioni. L'accordo tra i sismogrammi ottenuti con il codice alle differenze finite e i dati conferma ancora una volta che la conoscenza della geologia locale è cruciale per l'interpretazione del moto del suolo.

Nell'ultima fase di queste ricerche, si è fatto uso di simulazioni in tre dimensioni per determinare l'influenza delle eterogeneità negli strati più superficiali sulla polarizzazione delle onde sismiche. Questo studio, ancora ai suoi inizi, è una componente necessaria per la comprensione delle variazioni spaziali rapide delle risonanze direzionali osservate nei dati. I risultati preliminari confermano l'importanza delle caratteristiche geologiche degli strati più superficiali nel luogo di registrazione. Le simulazioni 3-D mostrano come topografia e gradienti laterali della velocità delle onde di taglio diano luogo a cambiamenti della polarizzazione delle onde sismiche anche su distanze molto piccole (decine di metri). Naturalmente, la struttura di velocità semplificata, utilizzata per le simulazioni 3-D, non riproduce le estreme variazioni osservate nei dati. L'approccio risulta, tuttavia, estremamente promettente.

9. Ricerche in Sismologia Storica

Le ricerche in Sismologia Storica rappresentano uno dei principali temi di attività dell'Istituto Nazionale di Geofisica. Nel periodo in oggetto si prevede di proseguire tali ricerche che, come nel passato a partire dal 1987, si avvarranno della collaborazione della Società S.G.A. di Bologna. L'interazione tra I.N.G. ed S.G.A. ha fino ad oggi portato a una serie di importanti risultati scientifici e applicativi, il principale dei quali è certamente il *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia* di recente pubblicazione.

Con questo nuovo catalogo, l'I.N.G. sintetizza i risultati conseguiti durante circa dieci anni di ricerche, proponendo una forma diversa e innovativa di utilizzazione dei dati sulla sismicità storica. Con questa opera l'I.N.G. ha risposto a una crescente esigenza della comunità scientifica e ha formalizzato implicitamente il proprio ruolo nel campo della valutazione della pericolosità sismica nazionale. Alle attività legate a questo catalogo e al suo ulteriore sviluppo, attività che possono essere estensivamente definite "di servizio", si affiancano numerose altre iniziative che coinvolgono numerosi ricercatori dell'I.N.G. su diversi fronti disciplinari non necessariamente legati alla pericolosità sismica, e che, nel seguito, verranno definite come attività "di ricerca". Con l'espressione "servizio" si intendono in pratica attività quali il miglioramento della banca-dati del catalogo dal punto di vista dell'arricchimento delle fonti storiche, i perfezionamenti tecnologici del supporto con cui il catalogo è distribuito alla comunità scientifica, l'ideazione di nuove elaborazioni cartografiche per rappresentare eventi sismici storici, che hanno tutte ricadute immediate nelle valutazioni di pericolosità. Viceversa, con l'espressione "ricerca" si intendono quelle attività che richiedono un progetto specializzato e specifiche competenze storiche e/o archeologiche, e che hanno per obiettivo il reperimento e l'elaborazione di nuovi dati e lo sviluppo di ottiche di ricerca innovative. Naturalmente tale distinzione ha solo valore puramente esemplificativo e non riflette la "scientificità" né tantomeno la qualità delle iniziative proposte, che sono comunque destinate a integrarsi, una volta raggiunto un determinato livello di maturazione.

9.1 *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e proseguimento delle ricerche di base*

È opportuno innanzi tutto sottolineare che il *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia* recentemente pubblicato dall'I.N.G. (1995) è sostanzialmente una *revisione* del precedente stato delle conoscenze (fotografate dal cosiddetto *Catalogo del Progetto Finalizzato Geodinamica*, del 1985), e che la sua utilità consiste non solo e non tanto nella valutazione di nuovi parametri, peraltro numerosi, ma soprattutto nella nuova impostazione data all'uso delle osservazioni storiche, volte non solo a rendere più dettagliata la descrizione dei danni da terremoto ma anche a migliorare la conoscenza dei contesti antropici per una più corretta valutazione degli effetti stessi. Alla luce di questa impostazione, le nuove ricerche punteranno ad approfondire eventi sismici di elevato impatto antropico che ancora non sono stati analizzati in dettaglio e ad estendere l'analisi a eventi non ancora revisionati a partire dall'intensità epicentrale VII M.C.S.. L'importanza di questo secondo aspetto risiede anche nel fatto che è già stata riscontrata la possibilità che eventi di elevata energia siano stati marginalmente ricordati, in epoca storica, solo come effetti locali in qualche centro urbano (si veda l'esempio del terremoto dell'Aquilano del 1315, ampiamente descritto nel Catalogo). Casi come questo non devono sorprendere perché per il periodo fino al XVI secolo il catalogo da revisionare (che ha sostanzialmente per base i dati pubblicati da Baratta nel 1901) si presenta largamente incompleto. In particolare ci potrebbero essere variazioni

consistenti sia sulle localizzazioni sia sulle intensità epicentrali, soprattutto nella fascia dei terremoti a cui viene correntemente assegnato l'VIII grado. Eventi di queste dimensioni non sono di per sé fortissimi (magnitudo corrispondente 5.0-6.0, considerando anche le incertezze sull'assegnazione dell'intensità), ma sono molto frequenti in Italia (se ne conta mediamente almeno uno all'anno) e hanno luogo particolarmente in zone a sismicità "minore", generalmente non attentamente considerate dal punto di vista della pericolosità sismica e della vulnerabilità degli edifici. Esempi recenti di questo tipo sono i terremoti dei Colli Albani del 1989, di Potenza del 1990, di Pollina (Sicilia settentrionale) del 1993, della Lunigiana del 1995, tutti accompagnati da danni che possono essere anche piuttosto estesi qualora l'epicentro sia particolarmente vicino a centri urbani storici. In sintesi, l'opportunità di estendere le revisioni a tutti i terremoti di VIII grado ed eventualmente anche a quelli di VII è motivata dalle particolari caratteristiche insediative storiche della penisola e dal forte sviluppo urbanistico dell'ultimo ventennio, condizioni tali per cui il rischio sismico è oggi elevato anche in presenza di una sismicità che altrove verrebbe considerata *moderata*.

Un'attenzione particolare sarà dedicata agli eventi sismici distruttivi "nuovi", ovvero precedentemente non noti al *Catalogo del Progetto Finalizzato Geodinamica*. Nel triennio in oggetto le varie tracce raccolte nel corso delle recenti ricerche potranno essere sviluppate attraverso ricerche locali approfondite, e il complesso dei risultati ottenuti potrà dare origine a una nuova sezione di dati del *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia*.

È opportuno tuttavia ricordare che il proseguimento degli studi per l'arricchimento e l'aggiornamento del nuovo catalogo non può rispondere pienamente alle nuove domande poste da quanti operano nel campo della valutazione della pericolosità sismica. Occorre infatti affrontare anche altri settori di indagine per definire in termini quantitativi quale sia il grado di risoluzione offerto dal catalogo per i diversi contesti storici e geografici. In altre parole, proprio i risultati conseguiti negli ultimi anni e sintetizzati nel nuovo catalogo mostrano la necessità di affrontare con decisione la questione della "completezza" del catalogo, e soprattutto di non far scaturire le relative valutazioni dall'ambito del *sistema referenziale* costituito oggi dal catalogo stesso, bensì da fonti d'informazione indipendenti. Per fare ciò occorre prendere in considerazione aree di specifico interesse per l'interpretazione sismologica e indagare in modo sistematico nella loro storia territoriale nel lungo periodo. Volendo semplificare al massimo, in ciascuna di queste zone occorre rispondere alla domanda: *la mancanza di eventi sismici importanti è dovuta a mancanza di informazioni o a mancanza di attività sismica?* L'importanza delle cosiddette *aree silenziose* è stata già segnalata in recenti interventi (si veda l'Introduzione al *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia*), e tali aree costituiscono un importante oggetto di ricerca per i prossimi anni. Tra queste aree può essere citata la costa settentrionale della Sicilia, dove a un contesto geodinamico del tutto simile a quello dei settori più attivi dell'Appennino meridionale e della Calabria fa riscontro una sismicità sporadica e mal compresa ma anche una notevole complessità nello sviluppo delle reti insediative e quindi, in ultima analisi, una possibile lacunosità sia in senso storico che geografico dell'informazione disponibile.

9.2 Risposta sismica in aree urbane

Nei prossimi anni verranno riprese e intensificate le ricerche sulla risposta sismica di importanti aree urbane durante forti terremoti del passato. Tali ricerche contribuiscono alle ricerche sui cosiddetti "effetti di sito", inomogenetità del livello di