

- c) Estendere l'analisi della ridistribuzione di sforzo causata da terremoti alla evoluzione della deformazione e dello sforzo post-sismico determinato dai processi viscoelastici dell'astenosfera.

Lavoro svolto:

- a) Per quanto riguarda i lavori relativi allo studio dello stato di sforzo delle strutture sismogenetiche sono stati ottimizzati alcuni codici esistenti ed applicati alle diverse aree sismogenetiche italiane quali l'Appennino umbro-marchigiano, la Calabria, il Friuli.
- E' stata modellata la deformazione co-sismica e lo stato di sforzo delle faglie attivate durante la sequenza sismica umbro-marchigiana (Settembre 1997-Aprile 1998) al fine di analizzare l'interazione tra le diverse strutture e per determinare il cambiamento delle condizioni di occorrenza di successivi eventi sismici. Questo studio è stato realizzato in collaborazione con G. Ekström (University of Harvard, USA).
- Nel corso del 1998, in collaborazione con l'Osservatorio Vesuviano, è stato avviato un nuovo studio al fine di fornire una spiegazione all'andamento spazio-temporale della sequenza umbro-marchigiana considerando il ruolo giocato dai fluidi.
- L'andamento temporale di questa sequenza mostra infatti evidenze di migrazione di fluidi che sono anche supportate dall'esistenza di probabili piani riattivati e di variazioni temporali del V_p/V_s .

Nell'ambito del progetto CEE "Faust" (ENV-4970528, coordinatore scientifico: Dr. M. Mucciarelli, Ismes spa, Seriate (BG)), è stato ulteriormente sviluppato e migliorato il programma *fortran* per il calcolo delle deformazioni e degli sforzi co-sismici causati da processi di dislocazione ora disponibile sul sito internet del progetto (<http://faust.ismes.it/>). Tale procedura è stata e verrà utilizzata per l'analisi delle interazioni tra strutture sismogenetiche adiacenti appartenenti ad alcune aree-campione del progetto stesso, tra cui la Calabria. I risultati di queste applicazioni costituiranno le basi per un confronto tra le tradizionali tecniche di determinazione del rischio sismico e approcci innovativi basati sull'identificazione delle possibili sorgenti sismogenetiche e sulla evoluzione temporale del potenziale sismogenetico che le caratterizza.

E' stato modellato lo stato di sforzo delle faglie attivate durante la sequenza sismica che ha interessato il Friuli tra il 1976 e il 1979 al fine di analizzare l'interazione tra le strutture appartenenti alla catena Alpina (orientate Est-Ovest) e a quella Dinarica (orientate NO-SE). Questo studio ha permesso di interpretare l'andamento spaziale-temporale dei terremoti di magnitudo maggiore avvenuti durante tale sequenza e di spiegare la migrazione della sismicità da Est verso Ovest. Su questo tema di ricerca è stata svolta una tesi di laurea presso l'Università di Roma "la Sapienza".

- b) Nel corso del 1998, in collaborazione con il dott. Ross S. Stein (USGS, Menlo Park, California), sono stati completati gli studi dei campi di deformazione e sforzo indotti da eruzioni vulcaniche e da processi di dislocazione per lo studio delle interazioni tra strutture sismogenetiche e vulcaniche. In particolare, sono stati sviluppati

ed utilizzati alcuni codici numerici per calcolare le variazioni di sforzo statico per studiare le possibili interazioni tra i forti eventi sismici, storici e recenti, dell'Appennino meridionale e le maggiori eruzioni del Vesuvio negli ultimi 400 anni.

- c) Lo studio dei fenomeni post-sismici verrà eseguito mediante un codice di calcolo originale che verrà realizzato in collaborazione con alcuni ricercatori dell'U.O.SFIT. In collaborazione con il dott. A. Piersanti è stato migliorato e sviluppato il programma *fortran* per il calcolo delle deformazioni e degli sforzi post-sismici causati da processi di dislocazione utilizzando un modello di Terra sferica viscoelastica, stratificata e auto-gravitante (modello di Piersanti et al., 1995, 1997).¹

E' realizzato uno studio delle deformazioni co- e post-sismiche indotte da processi di dislocazione che avvengono lungo faglie di dimensioni finite e caratterizzate da geometrie, meccanismi e profondità arbitrarie; sono stati analizzati gli effetti della sfericità, della gravità, della stratificazione reologica e della viscosità sul campo di deformazione co-sismico e post-sismico.

E' stato applicato tale codice di calcolo per analisi dei campi di deformazione e di velocità di deformazione prodotti dal grande terremoto del Cile del 1960.

Sono in corso studi degli effetti della sfericità, gravità, stratificazione reologica e viscosità sulla distribuzione dello sforzo post-sismico a breve distanza dalle strutture sismogenetiche (~500 km).

7. Linea di ricerca: caratteristiche spazio-temporali della sismicità a fini previsionali.

Diversi metodi per la previsione dei terremoti sono basati sull'analisi della variazione della sismicità. L'analisi che è stata sviluppata è basata sulla supposizione che due stadi consecutivi si susseguono nella sorgente di un futuro terremoto, lo stato della quiescenza e quello dell'attivazione dei foreshocks. In questo processo la quiescenza quasi sempre si verifica durante lo stato di accumulazione dell'energia sismica nel corso della preparazione del terremoto. Tali stadi possono essere quantizzati in un parametro prognostico. Il calcolo retrospettivo di questo parametro per aree interessate da forti terremoti, quali la Kamchatka ed il Caucaso ha prodotto risultati molto soddisfacenti. L'esempio di 4 forti terremoti della Kamchatka ($M > 7$) e del terremoto di Spitak ($M = 6.9$) mostra che nell'intervallo di 3 anni precedenti il terremoto, la sismicità dell'area epicentrale ha avuto una quiescenza seguita da attivazione di foreshocks. Le aree nelle quali gli stadi si sono susseguiti, hanno dimensioni lineari diverse volte più grandi della misura della sorgente calcolata.

Il metodo descritto è stato applicato ad alcune aree sismogenetiche dell'appennino centro-meridionale e alla sismicità dell'area Umbro-Marchigiana. I problemi di completezza del catalogo, dovuti alla sola recente espansione della Rete Sismica Nazionale Centralizzata su tutto il terreno nazionale hanno comportato un notevole lavoro preliminare di analisi.

8. Progetto Downhole (Stazione a larga banda in pozzo).

Nel corso del 1998 si è reso necessario estrarre la stazione broad band dal pozzo di 135 metri perforato in località Casaglia, presso il comune di Ferrara, per un suo aggiornamento software e hardware. Le registrazioni ottenute nel corso dell'anno hanno comunque consentito uno studio sulla risposta di sito. Sono state analizzate le registrazioni digitali ottenute sia dalla stazione in pozzo che da una stazione installata in superficie presso lo stesso sito. La risposta sismica degli strati alluvionali compresi tra i due sensori è stata studiata utilizzando registrazioni di rumore sismico e di terremoti locali attraverso la tecnica dei rapporti spettrali e di Nakamura. Otto degli eventi utilizzati appartengono alla sequenza sismica del terremoto $M_L = 4.8$ di Reggio nell'Emilia del 15-10-96 avvenuti a circa 80 km dalle stazioni e due sono eventi regionali. Il rumore sismico è stato registrato in finestre di 40 secondi nell'arco di un'intera giornata. I rapporti spettrali mostrano una rapida salita intorno a 0.7 Hz e tre picchi principali a circa 0.8, 2 e 3 Hz. La risposta empirica è stata quindi confrontata con quella teorica ottenuta applicando il metodo di Haskell-Thomson. Le risonanze trovate dalle diverse tecniche sono estremamente simili e tutte evidenziano un picco di amplificazione a 0.8 Hz corrispondente alla frequenza fondamentale dello strato di sedimenti. La convoluzione della registrazione in pozzo con la risposta teorica degli strati superficiali, evidenzia l'assenza di energia intrappolata, sotto forma di onde superficiali, nel bacino della Pianura Padana. Il lavoro è stato descritto in un articolo sottomesso al BSSA.

9. Progetto Rete Sismica Nazionale Centralizzata Digitale.

Nel corso del 1998 è stata installata a Montasola il prototipo della stazione digitale a 24 bit a una componente realizzato presso il laboratorio elettronico dell'I.N.G.. Tale esperimento ha messo in evidenza alcuni limiti inerenti l'affidabilità delle linee di trasmissione fornite attualmente dalla Telecom-Italia. In particolare è stato verificato che la linea di trasmissione, in genere funzionante con una bassa percentuale di errori, può improvvisamente presentare dei periodi prolungati di malfunzionamento non attribuibili alle nostre apparecchiature, ma legati alla linea stessa. Le stesse prove di trasmissione effettuate connettendo la stazione digitale direttamente al sistema di acquisizione dei dati ed eliminando la linea di trasmissione hanno mostrato che il sistema è in grado di funzionare correttamente e senza alcuna interruzione.

Per ovviare ai problemi di trasmissione messi in evidenza dai test di funzionamento, abbiamo seguito due strade:

- 1) E' stato definito un protocollo di comunicazione tra stazione digitale e sistema di ricezione; tale protocollo richiede l'utilizzo di una stazione intelligente capace di memorizzare in loco i dati acquisiti. In caso di malfunzionamento delle linee di trasmissione il sistema centrale può richiedere alla stazione la ritrasmissione dei segnali mancanti. Nel corso del 1998 è stato iniziato il progetto di tale stazione.
- 2) E' stata presa in esame l'ipotesi di utilizzare mezzi di comunicazione alternativi. In particolare sono state esaminate le caratteristiche di due sistemi di trasmissione satellitare forniti dalla Kinematics e dalla Nanometrics.

E' stato affrontato il problema dello scambio di dati in tempo reale con altri Istituti di Ricerca europei che gestiscono reti sismiche. I contatti intrapresi hanno condotto alla partecipazione al "Workshop on Seismic Data Exchange in the Alpine Region" tenuto a Zurigo all'inizio del 1999. La soluzione da noi adottata prevede l'utilizzo del formato standard internazionale SEED per la trasmissione dei dati dalla stazione al centro di acquisizione.

Unità Organica Sismologia e Fisica dell'interno Della Terra (SFIT)

Le tematiche sviluppate in questa U.O., che qui di seguito si analizzeranno sinteticamente, si riferiscono a ricerche 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 le seguenti linee di ricerca:

- Tettonica attiva e paleosismicità
- Determinazione del campo di stress nella crosta
- La struttura della litosfera in Italia e nel Mediterraneo
- Indagini geofisiche in mare per lo studio dell'evoluzione spazio-temporale di strutture sismogenetiche
- Variazioni spazio-temporali dell'attività sismica
- Macroe zonazione sismica del territorio nazionale
- Effetti della geologia di superficie sul moto del suolo
- Tettonica globale, paleogeografia e modellistica dei margini attivi
- Ricerca di sismologia globale
- Dinamica globale del mantello e rotazione terrestre

1. Sintesi dell'attività scientifica svolta nell'anno 1998

1.1. Tettonica attiva e paleosismicità

Durante il 1998 le attività di questo gruppo hanno proseguito lungo le tradizionali linee di studio inerenti la distribuzione della sismicità e la geologia dei terremoti. Queste attività, diverse delle quali hanno carattere fortemente innovativo anche a livello europeo, contribuiscono a consolidare il ruolo-guida che l'Istituto ha assunto da diversi anni anche a livello internazionale per quanto riguarda il contributo geologico alla valutazione della pericolosità sismica. Le attività svolte possono essere suddivise in due linee principali che vengono brevemente discusse qui di seguito.

Ricerche originali sul territorio nazionale

Queste ricerche hanno avuto come fine principale l'aumento delle conoscenze integrabili nel *Catalogo delle Faglie Sismogenetiche Italiane*, che nel 1998 è stato ribattezzato *Database of Potential Sources for Earthquakes Larger than 5.5 in Italy*, ulteriormente arricchito di nuovi dati e funzionalità e presentato ufficialmente in importanti sedi congressuali. Le ricerche per l'arricchimento del *Database of Potential Sources* hanno seguito le tradizionali linee indirizzate rispettivamente verso faglie evidenti o nascoste, studiate mediante la geomorfologia della zona di faglia e delle aree limitrofe, la microtopografia e l'apertura di trincee esplorative, e verso faglie cieche, la cui esistenza viene messa in evidenza attraverso l'analisi e la modellazione dei loro effetti di deformazione areale. Le tecniche di analisi utilizzate si avvalgono di programmi e procedure sviluppati negli anni precedenti nonché

di un sistema informativo geografico accessibile a tutti i componenti del gruppo.

Specifiche attività di ricerca che sono proseguite o sono state portate a termine riguardano la faglia sismogenetica che borda il bacino di Bojano (Molise), alcune importanti strutture sismogenetiche dell'Abruzzo centrale, nonché le strutture responsabili della crisi sismica umbro-marchigiana del settembre 1997.

La tradizionale attività di raccolta di variazioni di quota storiche presso l'archivio generale dell'Istituto Geografico Militare ha consentito di mettere in risalto un interessante fenomeno di deformazione crostale preparatorio alla crisi sismica umbro-marchigiana. L'elaborazione di tutti i dati finora raccolti ha consentito inoltre di mettere in luce deformazioni associate a due forti terremoti di questo secolo (1930, Alta Irpinia e 1962, Beneventano) per i quali l'evidenza strumentale è molto limitata. Queste ricerche hanno consolidato i legami di collaborazione con l'I.G.M. stesso in vista di future attività congiunte.

È stata completata l'elaborazione di una procedura per ottenere i parametri geometrici e spaziali di importanti sorgenti sismogenetiche da dati di intensità macrosismica. La procedura è stata applicata con successo come anello di congiunzione tra il *Catologo dei Forti Terremoti in Italia* e il *Database of Potential Sources*.

È stata infine pubblicata e presentata in varie sedi la sintesi finale del censimento sistematico delle evidenze di deformazione tettonica cumulata rappresentate dalla quota di linee di riva antiche in Italia peninsulare. Il censimento è servito da base per l'elaborazione di un modello geodinamico che comporta la flessurazione della litosfera appenninica come causa della sismicità maggiore della regione.

Ricerche originali all'estero

Durante il 1998 è proseguita l'attività di ricerca al di fuori dei confini nazionali.

Sono state svolte indagini preparatorie all'apertura di trincee nella Grecia centrale (Locride), sede del grande terremoto del 1894. Tali indagini includono la traduzione di testi dell'epoca e la ricostruzione di dettaglio della scarpata di faglia prodotta da quel terremoto.

È stata completata la ricostruzione tridimensionale dell'anticlinale detta delle Coyote Hills, nella parte più orientale del bacino di Los Angeles. L'anticlinale nasconde una delle strutture sismogenetiche più pericolose per l'intera area. Lo studio ha utilizzato una tecnica innovativa basata sulla stratigrafia di pozzi petroliferi e si è concluso con una proposta di modello di faglia.

È stata svolta una prima fase di ricerca lungo la faglia della Moyenne Durance, in Provenza. Tale faglia rappresenta una delle poche strutture sismogenetiche di tutta la Francia meridionale in grado di produrre terremoti significativi. Le analisi hanno riguardato elementi del paesaggio e della geologia recente, e si sono concluse con la modellazione di tali elementi e con la proposta di un modello di faglia sismogenetica.

Infine, in collaborazione con ricercatori dell'U.S.G.S. è proseguita l'organizzazione del database mondiale di dati sulla *dislocazione per evento* caratteristica di grandi faglie e importanti terremoti storici.

Attività di coordinamento delle ricerche e di elaborazione dei risultati

Nel 1998 l'attività di coordinamento si è incentrata su tre progetti di ampio respiro: il *Database of Potential Sources for Earthquakes Larger than 5.5 in Italy* del quale si è detto nei paragrafi precedenti; il *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia*, del quale è in preparazione la terza versione e di cui è stata preparata una versione da immettere in Internet; e il *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*, un catalogo di soli parametri epicentrali ed energetici ottenuto a partire dai due cataloghi nazionali oggi esistenti (quello dei Forti Terremoti in Italia prodotto dall'I.N.G. e quello denominato NT4.1.1 prodotto dal G.N.D.T.-C.N.R.).

Per quanto riguarda il *Database of Potential Sources*, lo schema complessivo di indagine e catalogazione è stato riproposto alla scala europea nell'ambito del progetto comunitario Faust, per il quale il 1998 è stato il primo anno di attività. Lo schema di visualizzazione delle sorgenti sismogenetiche a sua volta è stato trasposto in InterNet tramite una versione semplificata del G.I.S. utilizzato per il catalogo italiano.

Nel quadro degli studi propedeutici alla nuova versione del *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia* sono stati approfonditi diversi aspetti che legano la sismologia storica alla geologia dei terremoti, ad esempio attraverso il censimento degli effetti sull'ambiente dei principali terremoti.

Tutti i temi descritti hanno visto il coinvolgimento e il coordinamento sia di personale afferente al gruppo, tra cui diversi borsisti finanziati con fondi della Comunità Europea, sia di personale esterno in misura crescente rispetto al passato.

1.2. Determinazione del campo di stress nella crosta

Una migliore definizione, qualitativa e quantitativa, del campo di stress attuale aiuta alla comprensione dell'evoluzione geodinamica recente dell'area italiana nel contesto del Mediterraneo. Sono molti infatti i problemi irrisolti e le situazioni poco chiare a causa della scarsità di dati affidabili per la comprensione dei processi geodinamici attivi nella nostra regione. La conoscenza approfondita degli sforzi che agiscono attualmente nella crosta è utile nella valutazione di pericolosità sismica di un'area e più in generale può contribuire agli studi di sismotettonica dell'Italia tramite il raffronto e l'analisi critica di dati provenienti da ricerche di tipo diverso (dati storici, paleosismologici, geodetici, geologici).

La disponibilità delle principali compagnie di esplorazione italiane a fornire i dati necessari per lo studio del campo di stress ha permesso già da qualche anno, presso l'I.N.G., di ottenere un quadro dettagliato del campo di stress attivo in gran parte della Penisola italiana, che ogni anno risulta sempre più definito. La metodologia a cui si fa riferimento - studio dei *breakout* - è relativa all'analisi delle deformazioni nelle perforazioni profonde e permette di determinare l'orientazione dello sforzo minimo e massimo sul piano orizzontale.

L'analisi di dati di *breakout* nel 1998 è stata effettuata lungo il margine adriatico marchigiano e romagnolo. Sono stati analizzati circa 20 pozzi che fanno parte di un set completo di dati (circa 70 perforazioni) relativo alle regioni Marche, Emilia Romagna, Lombardia e Toscana. Obiettivo principale del 1998 è stato quello di creare una mappa dello stress attivo in Italia integrando i dati di sforzo oggi disponibili. La costruzione di questa mappa è avvenuta in collaborazione con altri ricercatori dell'I.N.G. in maniera tale da renderla più completa e omogenea possibile. In particolare modo abbiamo

prestato la nostra attenzione ad una rilettura critica di ogni singolo dato inserito, attribuendo poi a ciascuno un fattore di qualità oggettivo conforme a quanto descritto nel World Stress Map Project. Questa mappa costruita utilizzando 200 dati puntuali è quindi corredata di una serie di tabelle che contengono tutte le informazioni necessarie di ogni singolo dato.

Parallelamente sono state terminate diverse pubblicazioni (la maggior parte ora in stampa sulle principali riviste internazionali) relative sia alla determinazione del campo di stress attivo in confronto con la sismicità e la tettonica (Pianura Padana e Appennino centro-settentrionale), sia all'evoluzione spazio-temporale del campo di stress utilizzando metodologie interdisciplinari (breakout, anisotropia della suscettività magnetica, sismicità e datazioni di terreni) e sia allo studio delle deformazioni tettoniche in seguito al terremoto di Colfiorito del 1997.

È stato aggiornato il sistema software e hardware dedicato all'analisi dei dati di stress e implementato in maniera tale da poter quanto prima provare a determinare il valore assoluto dello stress attraverso i calcoli del sigma verticale e dei due sigma orizzontali minimo e massimo.

Nel mese di aprile viene attivato un progetto di ricerca tra I.N.G. e Eni dal titolo: "Campo di stress attivo e strutture sismogenetiche in Italia" mirato all'analisi sia di nuovi dati di breakout in pozzo che a studi sulla definizione delle principali faglie sismogenetiche visibili da linee sismiche a riflessione. Presso Eni si è presa visione delle linee sismiche profonde passanti per la zona di Colfiorito e in collaborazione con il Prof. A. Mazzotti dell'Università di Milano si sta iniziando un re-processing di tali linee mirato ad una migliore definizione delle faglie attive responsabile dei principali eventi sismici dell'area oggetto di studio.

Proseguono gli studi sul "Cape Roberts Drilling Project" all'interno del gruppo di analisi dello stress nella crosta in Antartide.

1.3 Variazioni spazio-temporali dell'attività sismica

Il programma di ricerca legato alla definizione della probabilità di occorrenza di eventi sismici a breve termine si è sviluppato con particolare intensità grazie anche allo scambio di vedute con ricercatori stranieri venuti in visita presso l'ING e mediante il soggiorno di ricercatori dell'ING presso Enti stranieri. In questo modo è stato sviluppato un modello stocastico per sequenze di terremoti, nonché gli algoritmi necessari per la determinazione della verosimiglianza ad esso associata e la sua verifica con metodi "bayesiani".

Nel presente modello i terremoti sono considerati come la realizzazione di un processo generalizzato di Poisson che tiene conto della storia pregressa. Non viene fatta, per il momento, alcuna ipotesi sul modello fisico che conduce a tale processo. Si assume come valida la legge di Gutenberg Richter con un parametro b costante, nei riguardi della distribuzione in magnitudo degli eventi in un qualsiasi campione scelto a caso. La densità spazio-temporale del tasso d'occorrenza viene modellata come la somma di due termini, uno dei quali rappresenta la componente spontanea, o indipendente, dell'attività sismica, e l'altro rappresenta la componente indotta dai terremoti precedenti. Il primo termine dipende soltanto dallo spazio, ed è modellato da una funzione continua delle coordinate, ottenibile lasciando la distribuzione discreta della sismicità strumentale passata mediante un'opportuna funzione-peso.

Il secondo termine dipende anche dal tempo, ed è scomponibile in due fattori che dipendono rispettivamente dalla distanza spaziale e da quella temporale rispetto agli eventi passati. Sotto questa ipotesi, tutti i terremoti hanno il potenziale di indurre eventi susseguenti, e tutti i terremoti possono essere potenzialmente indotti da eventi precedenti. Così, la distinzione fra *foreshocks*, *main shocks* e *aftershocks* perde significato. Conoscendo la densità del tasso atteso d'occorrenza, la verosimiglianza di una qualunque realizzazione del processo (rappresentata in pratica da un catalogo sismico) può essere calcolata senza particolari difficoltà.

Nella prima applicazione del modello ad un programma di calcolo, si è assunto che i tutti i parametri connessi con la dipendenza temporale siano indipendenti dalle coordinate spaziali. L'algoritmo qui descritto può essere utilizzato in due modi:

- (a) in una fase d'apprendimento, per la stima della massima verosimiglianza dei parametri liberi del modello; e
- (b) per la verifica dell'ipotesi.

Quest'ultima fase dovrebbe essere condotta su un set di dati nuovo ed indipendente, dopo aver fissato i valori di tutti i parametri liberi in gioco. Il test può eventualmente essere condotto in tempo reale. Le prove finora effettuate hanno mostrato che pochi mesi d'osservazione sismografiche condotte in una regione attiva, sono in genere sufficienti a valutare il superiore livello di significatività del modello a dipendenza temporale rispetto alla distribuzione di Poisson indipendente dal tempo.

È proseguita la ricerca, svolta in collaborazione con l'Università dell'Alaska dal 1993, basata su un pacchetto di programmi per l'analisi spazio-temporale dei cataloghi sismici (ZMAP). L'applicazione alla sismicità italiana ha condotto alla individuazione di alcuni fenomeni di quiescenza precedenti i principali terremoti avvenuti nell'ultimo ventennio, mettendo in evidenza le difficoltà che si possono incontrare per cercare un'omogeneità di modellazione di simili fenomeni. Tra le variazioni spaziali e temporali della sismicità messe in evidenza con il pacchetto software ZMAP si è rivelata di particolare interesse quella del parametro *b*, legato alla distribuzione in magnitudo della frequenza dei terremoti. Il parametro *b* consente di valutare il grado di eterogeneità dello sforzo all'interno delle zone sismogenetiche, e in tal senso la sua mappatura in tre dimensioni rappresenta un valido elemento per investigare lo stato fisico delle rocce in zone sismiche attive, con particolare evidenza per le zone vulcaniche e geotermiche. Con questo tipo di analisi è stato possibile investigare la probabile collocazione delle camere magmatiche nell'area etnea e l'eventuale limite inferiore del sistema geotermico di Larderello-Travale. Tale analisi mira a risultati di interesse pratico come, per esempio, indicazioni utili allo sfruttamento energetico di quest'area geotermica.

1.4. Macrozonazione sismica del territorio italiano

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 della elaborazione e compilazione 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.

E' stato applicato un metodo che fornisce a ognuno degli eventi sismici privi di mappa di isosisme un modello medio di propagazione dell'intensità, ricavato dall'analisi azimutale delle mappe macrosismiche conosciute. Sono stati utilizzati i dati provenienti dal *Catalogo Sismico Nazionale* (CSN) dell'Istituto Nazionale di Geofisica [ENEL, 1977; Postpischl, 1985b; I.N.G., 1989] e le 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.

L'analisi ha riguardato circa 4000 terremoti a partire dall'anno 1 d.C., data iniziale considerata perché anche per i primi secoli si hanno numerosi eventi documentati. Le mappe macrosismiche italiane utilizzate sono 528, relative a terremoti tra il 1500 e il 1987. Il limite temporale inferiore del 1500 è stato scelto perché da tale data i campi macrosismici si possono ritenere meglio definiti.

Tre mappe 1:1.500.000 rappresentanti la massima intensità risentita MCS, numero di effetti di VIII grado e il numero di effetti di VII grado sono state tracciate su basi cartografiche ufficiali dell'IGMI, ed hanno ottenuto l'imprimatur del Dipartimento della Protezione Civile, e sono già disponibili a stampa. Si prevede di realizzare un cofanetto contenente le tre mappe e un fascicolo illustrato di spiegazioni e commenti.

Sono state progettate alcune carte tematiche di correlazione con tematismi di interesse per usi di protezione civile alle quali dare più ampia diffusione. Un primo esempio di tali carte è stato dato per la regione Sicilia. L'esempio a scala regionale è costituito nella costruzione di una "carta tematica di valutazione integrata del territorio", in questo caso denominata "mappa dell'impatto socio-ambientale", utile all'identificazione delle aree più esposte a dissesto da eventi naturali su cui programmare interventi pubblici. Per la realizzazione di questa mappa sono state correlate le informazioni derivanti dalla Carta della Vulnerabilità alle Frane (Servizio Geologico), da quella delle Zone Suscettibili a Liquefazioni (Galli e Ferrelli), dai dati di densità di popolazione e di impianti di interesse economico con la Mappa della Massima Intensità Macrosismica (ING). Finora sono state costruite e sono disponibili le mappe tematiche, secondo il procedimento suddetto, per la regione Sicilia e per la regione Campania. Un sintetico report sulla mappa tematica campana è in pubblicazione sugli atti di un recente Convegno Linceo del 1998.

Si è anche eseguito per l'Italia (Scalera, Lincei 1996, Natural Hazards 1997) il confronto di tutte le rocce vulcaniche, i fronti in avanzamento e gli assi delle pieghe, digitalizzati dalla "Structural Kinematic Map" (Bigi et al., CNR, 1991), con tutti i corpi magnetizzati intrasedimentari riportati sulla mappa dell'Agip (Cassano, Fichera, e Arisi Rota, 1986). Le due mappe appaiono complementari con i corpi magnetici profondi che riempiono le lacune di vulcaniti in molte regioni (ad esempio in Toscana).

L'ulteriore confronto delle due mappe precedenti con l'andamento dell'indice macrosismico cumulativo Log C (Favali, Scalera e Smriglio, 1986; Favali, Scalera et al. 1990) rivela che i picchi di energia sismica si trovano preferenzialmente nelle zone in cui le vulcaniti sono assenti o in cui la loro continuità spaziale è interrotta, anche a scala locale. Risulta anche che la attività sismica è inibita nelle zone in cui esiste un minimo delle anomalie

di Bouguer, in relazione allo spessore crostale o a differenti caratteristiche reologiche (Scalera 1997). È in progetto la generalizzazione di questi risultati ad altre regioni soggette a vulcanesimo ed a intensa attività sismica.

1.5. Effetti della Geologia di superficie sul moto del suolo.

Lo scopo di questa linea di ricerca è di interpretare e di riprodurre numericamente i dettagli del moto del suolo durante i terremoti in funzione della struttura geologica del sottosuolo.

L'esperienza degli anni più recenti ha mostrato che in presenza di eterogeneità della geologia locale si possono osservare variazioni dello scuotimento fino a un fattore dieci entro distanze di 100 metri o meno. Questi effetti rivestono particolare importanza nelle aree urbane, dove durante i terremoti i danni maggiori tendono talvolta a concentrarsi in zone di limitata estensione a causa di complessi fenomeni di interferenza delle onde sismiche che possono produrre, localmente, elevate amplificazioni del moto del suolo.

Durante il 1998, lo studio di questa tematica ha avuto molteplici obiettivi:

- i) procedere all'installazione di reti di monitoraggio in aree urbane di grande interesse;
- ii) perfezionare i mezzi di calcolo per la simulazione numerica dei processi di propagazione delle onde sismiche in mezzi altamente eterogenei;
- iii) analizzare i dati strumentali registrati durante la lunga sequenza sismica iniziata nel Settembre 1997 al confine tra Umbria e Marche.
- iv) definire nel dettaglio le geometrie sepolte nella Piana di Colfiorito ed investigare i caratteri geologico-strutturali dell'area epicentrale con lo scopo di stabilire le possibili relazioni con gli effetti riscontrati attraverso l'analisi dei dati strumentali.

Per quanto riguarda il primo punto, sono state scelte le città di Firenze e Catania. Grazie alla collaborazione con l'Osservatorio Ximeniano di Firenze e il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università di Catania, si è pianificata l'installazione di 6 sismometri a larga banda in entrambe le città. Di questi, 3 sono stati messi in funzione nel 1998.

Gli altri 3 saranno operativi entro i primi mesi dell'anno successivo.

Nell'ambito della ormai consolidata cooperazione con il CASPUR (Consorzio per le Applicazioni di Supercalcolo per Università e Ricerca), è proseguito il progetto triennale riguardante lo sviluppo di procedure di calcolo attraverso computer paralleli. La necessità di tali architetture è dettata dalla esigenza di ridurre i tempi di calcolo a fronte della crescente complessità dei modelli al di fuori della portata dei più avanzati sistemi per il calcolo seriale. Sono state realizzate altresì nuove procedure di

animazione grafica che consentono di visualizzare con grande dettaglio il ruolo giocato dalle interfacce nei processi di conversione di onde di volume in onde superficiali, in funzione dell'angolo di incidenza e del contrasto dell'impedenza sismica.

L'analisi dei sismogrammi registrati in Umbria ha riguardato le aree di Colfiorito, Verchiano e Nocera Umbra. In entrambi i casi l'uso di numerosi dati strumentali ha consentito di mettere in evidenza forti variazioni del movimento del suolo entro distanze dell'ordine del centinaio di metri durante gli stessi terremoti. Si è altresì accertato che l'elevata accelerazione registrata durante l'evento del 26 settembre 1997 alle ore 02:33 in due dei siti studiati (0.6 g a Nocera Umbra e 0.4 g nella piana di Colfiorito) non è in realtà attribuibile a un effetto della sorgente sismica: la causa è risultata la presenza di una zona di faglia nel primo caso, e la forte diffrazione al bordo del bacino nel secondo caso. Si è modellato il comportamento della zona di faglia mediante un cuneo di bassa velocità, largo 160 m e profondo 1 km.

Tale struttura si comporta come una guida d'onda, che intrappola l'energia incidente e, a causa di processi di interferenza costruttiva, amplifica il moto del suolo sulla superficie. Anche l'effetto di bordo nella piana di Colfiorito è stato interpretato e modellato come un fenomeno di interferenza su scala locale.

E' stata avviata un'indagine geologico-strutturale di dettaglio nella zona interessata dalla sequenza sismica, finalizzata alla individuazione delle principali zone di faglia, delle direzioni dei clivaggi pervasivi e dei campi di intensa fratturazione associati a zone di taglio, con lo scopo di studiare la relazione tra questi elementi e alcuni caratteri peculiari della risposta sismica evidenziati dai dati strumentali.

1.6. Tettonica globale, paleogeografia e modellistica dei margini attivi

Si sono individuate somiglianze tra intere forme di continenti e vaste zone oceaniche più rare di quelle di tipo atlantico. La loro disposizione non casuale accresce il numero e la complessità dei tipi di somiglianze di cui si deve tenere conto quando si confrontano diverse teorie tettoniche globali. Questa ricerca ha dato spunto alla focalizzazione di numerose altre tematiche volte al confronto critico tra schemi teorici differenti: la paleogeografia, il paleomagnetismo, la modellistica per i margini attivi.

Sono stati presi in considerazione due modelli di cinematica delle placche, quello ben noto della Tettonica a zolle (*plate tectonics*) e quello alternativo dell'espansione della Terra (*expanding Earth*). Per una verifica, un passo importante è la realizzazione di serie di ricostruzioni paleogeografiche su globi di raggio crescente, che siano compatibili con i dati geologici, paleomagnetici, paleontologici e internamente coerenti tra loro. Per verificare la compatibilità di relazioni tra terreni di uguale età oggi molto lontani tra loro si sono usati i dati provenienti dalla completa digitalizzazione per frammenti coevi della mappa di Larson et al. [1985] "Bedrock Geology of the World", e dalla mappa di Roeser & Rilat [1982] "Identified magnetic sea-floor spreading anomalies", integrata con gli aggiornamenti di Nakanishi et al. [1992] per il Pacifico nord-occidentale. I paleopoli dei continenti sono stati estratti, con un software appositamente creato presso l'I.N.G. usando i dati del "Global Paleomagnetic Data base"

(volume monografico della *Geological Society of London*). Il software di estrazione è stato messo a disposizione su un nodo Internet e le istruzioni per il suo uso pubblicate sulla rivista *EOS* dell'*American Geophysical Union*. Sono state così ricostruite le mappe della antica posizione dei continenti e degli oceani per valori del raggio terrestre R pari a 3.800, 4.800 e 5.300 km.

È attualmente in corso la ricostruzione paleogeografica relativa al Triassico, quando nell'ottica espansiva nessun oceano era presente. I paleopoli relativi sono stati estratti dal GPMDB con criteri di qualità adattati di volta in volta al continente in considerazione. Si sta usando come raggio di prova $R = 3500$ km.

È in progetto la ricostruzione per il Cambriano e per il Miocene.

Come corollario a queste ricostruzioni non convenzionali è stato altresì costruito un modello non subduttivo per le zone di fossa-arco-retroarco (FAR) basato sullo stato di stress tensionale della fossa e sulla presenza di una fascia vulcanica sull'arco e retroarco che esercita una spinta sull'orogene dell'arco. Hanno parte nel modello lo *spreading* vulcanico, lo scivolamento gravitativo dell'arco verso la fossa e la perturbazione ad alta frequenza delle maree terrestri che lo favorisce. Lo *spreading* vulcano-gravitativo è accompagnato da piegamenti e scorrimenti della crosta oceanica a formare il complesso accrezionale. La copertura dell'orogene giunto sotto il livello del mare con lave a cuscino e una sequenza ciclica di innalzamenti con esumazione di crosta profonda sembra spiegare alcune delle caratteristiche delle zone FAR come la obduzione dei terreni ofiolitici, la presenza della zona di Benioff, l'alto flusso di calore del retroarco, e alcune proprietà del metamorfismo. Cicli ripetuti di apertura del retroarco, riempimento della fossa, subsidenza e innalzamento dell'arco e del complesso di accrezione, sembrano portare alla fase matura della zona FAR con le caratteristiche geologiche attuali. Le profonde zone di Benioff potrebbero essere spiegate da una risalita di materiali più caldi e leggeri dal mantello e da loro improvvisi cambiamenti di fase in ambiente duttile. Miglioramenti e adattamenti del modello suddetto ad altre zone e situazioni reali sono in corso di studio.

Le ricostruzioni già eseguite e il modello di evoluzione dei margini sono stati pubblicati su *Annali di Geofisica*.

1.7. Principali argomenti di ricerca di sismologia globale

1.7.1 Calcolo di tensori momento sismico su scala regionale

Il calcolo dei meccanismi focali di terremoti di dimensioni intermedie e grandi ($M > 5.5$) viene effettuato in modo robusto e affidabile sulla base dell'inversione di sismogrammi a lungo periodo registrati a distanza telesismica, utilizzando tecniche come il Centroid Moment Tensor (CMT). Il Mediterraneo è però caratterizzato da sismicità di moderata energia e risulta molto significativo sviluppare tecniche in grado di utilizzare registrazioni a distanza regionale ($d < 2000$ km) di onde superficiali di periodo intermedio (da 30-35 secondi a 130) che sono caratterizzate da un più alto rapporto segnale / rumore ma richiedono una migliore conoscenza del modello di propagazione.

La collaborazione con l'università Harvard su questo tema, iniziata nell'autunno 1997, è proficuamente continuata durante il 1998. Due sono gli obiettivi principali di questo progetto: da un lato, l'abbassamento della soglia di magnitudo minima degli eventi analizzabili, sia per quelli correnti che per quelli recenti; dall'altro, l'analisi di terremoti precedenti l'avvio del progetto CMT di Harvard, che affrontiamo digitalizzando sismogrammi analogici della rete WWSSN.

Abbiamo studiato tutta la sequenza sismica umbro-marchigiana del 1997-98, utilizzando principalmente i dati delle stazioni MEDNET italiane e delle zone circostanti, calcolando i meccanismi focali per 120 maggiori eventi entro poche ore dal loro verificarsi. I terremoti sono tutti caratterizzati da meccanismi di fagliazione normale, con asse di tensione diretto NE-SW, e con piano di faglia immergente verso SW a basso angolo. La coerenza della geometria degli eventi della sequenza è notevole: soltanto uno degli eventi ha mostrato geometria trascorrente. Questo mostra che, almeno per magnitudo da $M_w=4.2$ in su, i singoli eventi della sequenza hanno fratturato strutture con orientazione molto simile. I meccanismi focali trovati sono serviti come riferimento per la maggior parte degli altri studi in merito.

La sequenza sismica avvenuta in Friuli nel 1976-77 comprende diverse forti scosse ed è conosciuta per la sua complessità. La zona epicentrale corrisponde alla zona di incontro tra strutture alpine e dinariche e non è stato precedentemente chiarito quale delle due strutture si sia attivata. Abbiamo riveduto le localizzazioni ipocentrali per i maggiori terremoti e abbiamo calcolato i loro tensori momento sismico. La sintesi delle informazioni geologiche, geodetiche e sismologiche mostra che i terremoti possono essere associati con i sovrascorrimenti periadriatici e alpini. Le tecniche di calcolo del tensore momento sismico sono state anche applicate allo studio di alcuni eventi avvenuti in mare e di interesse per la generazione di tsunami, come contributo al progetto GITEC-TWO, conclusosi a dicembre 1998.

Per alcuni, avvenuti tra il 1964 e il 1977, gli unici dati utilizzabili sono costituiti da sismogrammi analogici WWSSN, che sono stati reperiti e digitalizzati, mediante una precisa ma lunga procedura volta a preservare la fedeltà delle componenti di lungo periodo. Per altri, avvenuti dopo l'entrata in funzione della rete sismografica globale digitale, i sismogrammi sono invece facilmente reperibili. Sono stati complessivamente studiati 4 terremoti pre-1997 (mediante digitalizzazione di 126 tracce sismografiche) e 9 eventi recenti. I parametri di sorgente ottenuti possono essere utilizzati come dato per la modellazione della generazione degli tsunami.

I risultati sono stati presentati a convegni internazionali e sono pubblicati e in corso di pubblicazione su stampa specializzata internazionale.

1.7.2. Quantificazione e geometria della deformazione sismica nel Mediterraneo

Abbiamo studiato la deformazione sismica del Mediterraneo occidentale, desumibile dall'analisi dei tensori momento sismico, con lo scopo di definire il pattern di deformazione che caratterizza questa porzione del margine di placca tra Africa e Eurasia. Abbiamo calcolato il tensore di momento cumulativo, relativo a 90 anni di dati sismologici, per diverse sezioni lungo il margine. I risultati sono confrontati con dati geodetici e con

il modello globale di movimento delle placche NUVELIA. Buon accordo è trovato lungo il Nord-Africa fino alla Sicilia, dove sono coinvolte soltanto Africa e Eurasia. In questa zona è evidente che cambiamenti nella direzione del margine corrispondono a variazioni della prevalente geometria della deformazione, delle caratteristiche tettoniche e della percentuale di deformazione sismica rispetto a quella totale attesa. La geometria della deformazione delle sezioni periadriatiche (Appennini centrali e meridionali, Alpi orientali, area adriatica orientale) sono in buon accordo con le misure VLBI e con le caratteristiche geologiche regionali. La sismicità rende conto di basse percentuali, dal 3% al 31%, della deformazione attesa totale. Soltanto nello Stretto di Messina il rapporto raggiunge un valore più alto (79%). Dobbiamo naturalmente osservare che il periodo di 90 anni considerato non è rappresentativo del ciclo sismico e la deformazione che otteniamo è dunque più indicativa della cinematica regionale di quanto lo sia della velocità assoluta di deformazione.

I risultati sono stati presentati a convegni internazionali e sono pubblicati e in corso di pubblicazione su stampa specializzata internazionale.

1.7.3. Studio di dettaglio dei meccanismi delle sorgenti sismiche dall'analisi a larga banda di sismogrammi a distanza telesismica

Abbiamo studiato le profondità focali e i processi di rottura di quattro terremoti di magnitudo moderata avvenuti in Italia nel 1997 e 1998 analizzando dati sismografici a larga banda telesismici. I terremoti, dei quali il maggiore è di magnitudo $M_w=6.0$, hanno causato ingenti danni nella zona epicentrale e appartengono alla recente sequenza umbro-marchigiana. Per tre degli eventi abbiamo trovato che le forme d'onda sono in accordo con rotture sismiche confinate nei primi 5-7 km della crosta. Sono evidenti effetti di direttività per il terremoto maggiore e l'inversione delle forme d'onda fornisce evidenze per una rottura verso l'alto con una componente orizzontale orientata verso il nord. L'inversione dei sismogrammi telesismici a larga banda conferma che uno dei terremoti, di magnitudo $M_w=5.2$, è localizzato alla profondità di circa 50 km. Questo è il primo terremoto con questa magnitudo ad essere rilevato nel mantello al di sotto degli Appennini. I risultati sono stati presentati a convegni internazionali e sono pubblicati e in corso di pubblicazione su stampa specializzata internazionale.

1.7.4. Tomografia del mantello nella regione Euro-Mediterranea

I tempi di percorso dei primi arrivi delle onde di volume a distanza regionale e telesismica, riportati sui Bollettini dell'ISC dal 1964 al 1995, sono utilizzati nel nostro nuovo studio tomografico per calcolare la forma delle anomalie di velocità nel mantello della regione Euro-Mediterranea. Il modello rappresenta una evoluzione di studi precedenti, nella quale la zona geografica è stata ampliata e modificata per ottimizzare la copertura di raggi sismici; la profondità massima è stata aumentata fino a 1400 km per rappresentare con maggiore precisione la zona di interfaccia tra mantello superiore e inferiore.

Molte delle anomalie del nostro modello, come le strutture di alta velocità associate a lastre litosferiche in subduzione (Mar di Alboran, arco Calabro-Appenninico, arco Dinaro-Ellenico, arco dei Carpazi) e litosfera stabile e fredda (Mediterraneo orientale, Adriatico, Mediterraneo occidentale)

e le regioni di bassa velocità (Egeo, bacini Tirrenico e Pannonico, Massiccio Centrale, province vulcaniche dell'Italia centrale) sono state riconosciute e interpretate nella letteratura recente. Tuttavia, alcune di esse differiscono dagli studi precedenti per estensione, continuità e ampiezza, mantenendo aperta la discussione sulle tecniche tomografiche, sia in termini di qualità e pre-trattamento dei dati, che di tecniche di inversione, margini di incertezza e interpretazione. Il nostro approccio, che parametrizza il modello per mezzo di *splines* lineari, evita i problemi connessi alle rappresentazioni a blocchi. La presenza di diversi esempi di apertura di bacini di retroarco, interpretati come dovuti al meccanismo di *slab roll-back* fa del Mediterraneo una zona molto interessante per il loro studio. Interruzioni della continuità delle lastre litosferiche subdotte sono state postulate sulla base di immagini tomografiche, che però non consentono, secondo la nostra modellazione, una interpretazione chiara e univoca. Caratteri notevoli del nostro modello sono anche la presenza, molto chiara e netta, della sutura di Tornquist-Tesseyre, che segna l'antico margine di placca tra il blocco tettonicamente più recente dell'Europa occidentale e il cratone dell'Europa orientale; il *plume* molto netto e definito, che alimenta la zona di vulcanismo recente del Massiccio Centrale francese; la vasta anomalia calda della zona di transizione al di sotto dell'Europa centrale, da alcuni postulata come serbatoio comune a tutte le zone vulcaniche terziarie e quaternarie dell'Europa centrale. I risultati sono stati presentati a convegni internazionali e sono pubblicati e in corso di pubblicazione su stampa specializzata internazionale.

1.7.5. Localizzazione epicentrale 3D

Variazioni laterali della struttura del mantello superiore causano scostamenti, riscontrabili su scala regionale e globale, dei tempi di percorso di onde sismiche dai valori calcolati in base a modelli di riferimento a simmetria sferica. Abbiamo analizzato i tempi di percorso di onde P per l'area mediterranea, usando sia arrivi telesismici che regionali, per terremoti superficiali riportati dai bollettini dell'ISC. Abbiamo modellato i ritardi tra coppie di celle di 0.5 gradi di lato, fornendo una rappresentazione dettagliata delle eterogeneità della propagazione delle onde P.

L'esame di queste anomalie mostra la chiara presenza di disegni geograficamente coerenti, solitamente in accordo con strutture geologiche note, che interpretiamo come dovute a struttura nel mantello superiore. Abbiamo ideato uno schema basato sull'utilizzo di correzioni empiriche ai tempi di percorso di onde P (Empirical Heterogeneity Correction, EHC) che utilizziamo per migliorare la localizzazione dei terremoti. Lo schema che usa l'EHC presenta benefici simili a quelli forniti dal tracciamento dei raggi in un dettagliato modello tridimensionale, ma è più semplice e molto più efficiente dal punto di vista computazionale.

La definizione del modello di eterogeneità della propagazione, essendo basato su una procedura statistica concettualmente molto semplice, evita la maggior parte dei punti critici e delle possibili instabilità inerenti l'inversione per il calcolo di un modello. La rilocalizzazione EHC, applicata a terremoti del Mediterraneo, permette di rappresentare circa il 70% del segnale che stimiamo dovuto alla eterogeneità e produce spostamenti di 4.66 km (rms) rispetto le semplici localizzazioni effettuate con un modello a simmetria sferica. Un esperimento sintetico, nel quale abbiamo utilizzato il nostro algoritmo per ritrovare coordinate epicentrali note, ci ha permesso di