

Progetto INGV/DPC S3

Direttore proponente: Warner Marzocchi, INGV Roma.

1. Motivazione

Tradizionalmente, le strategie per la riduzione del rischio sismico si basano sull'utilizzo delle mappe di pericolosità che rappresentano mappe di previsione probabilistica (*forecast*) del movimento del terreno atteso in un intervallo di tempo lungo, in Italia 50 anni. La pericolosità viene solitamente stimata tramite modelli *time-independent*, cioè si assume che la pericolosità rimanga costante nel tempo. In realtà, la pericolosità non è costante poiché i processi che generano i terremoti dipendono dal tempo. In particolare, nel breve termine (giorni/settimane), la probabilità di accadimento dei terremoti può aumentare anche di 3-4 ordini di grandezza rispetto al modello di accadimento *time-independent* che sta alla base della mappa di pericolosità. Le variazioni più evidenti si hanno durante una sequenza sismica dopo un terremoto forte (*aftershocks*), ma variazioni importanti si hanno anche durante sequenze sismiche o dopo terremoti di media magnitudo (*foreshocks*) che possono anticipare un terremoto forte. L'eventuale presenza di precursori può aumentare tale probabilità ancora di più.

Finora queste variazioni temporali delle probabilità di accadimento non sono ancora sfruttate in pratica. Esistono molte ragioni per questa lacuna, alcune scientifiche ed alcune connesse con la capacità di definire azioni di mitigazione in assenza di certezze (*decision-making under uncertainties*; vedi Van Stiphout et alii, 2010; Jordan e Jones, 2010; Woo, 2010). Al fine di ridurre alcune di queste lacune, la Commissione Internazionale per la prevedibilità dei terremoti nominata dalla Protezione Civile dopo il terremoto di L'Aquila nel 2009 (ICEF; Jordan et alii, 2011) suggerì alcune raccomandazioni per future attività. Di seguito si riportano solo quelle inerenti il forecast dei terremoti di breve termine

Recommendation A: *DPC should continue to track the scientific evolution of probabilistic earthquake forecasting and deploy the infrastructure and expertise needed to utilize probabilistic information for operational purposes.*

Recommendation E1: *DPC should emphasize the deployment of an operational capability for forecasting aftershocks.*

Recommendation E2: *DPC should support development of earthquake forecasting methods based on seismicity changes to quantify short-term probability variations.*

Recommendation C: *A basic research program focused on the scientific understanding of earthquakes and earthquake predictability should be part of a balanced national program to develop operational forecasting.*

Recommendation F1: *Forecasting methods intended for operational use should be scientifically tested against the available data for reliability and skill, both retrospectively and prospectively. All operational models should be under continuous prospective testing.*

Recommendation F2: *The international infrastructure being developed to test earthquake forecasting methods prospectively should be used as a tool for validating the forecasting models for Italy.*

Uno dei concetti chiave del report di questa commissione è l'*Operational Earthquake Forecasting* (OEF; vedi raccomandazioni A, E1 ed E2) definito come:

Operational earthquake forecasting (OEF) is the production of authoritative information about the time dependence of seismic hazard to help communities to prepare for potentially destructive earthquakes.

E' di particolare importanza il termine "autoritativo". Le raccomandazioni F1 e F2 pongono un forte accento sulla continua e sistematica validazione dei modelli e suggerisce qualcosa in più rispetto all'utilizzo di un singolo modello scelto arbitrariamente tra altri modelli e solo parzialmente verificato.

Lo scopo principale di questo progetto è quello di fornire uno schema OEF che rispetti le raccomandazioni della commissione internazionale e di perseguire studi che possano permettere il miglioramento delle conoscenze attuali.

2. Obiettivi

Gli obiettivi principali per il primo anno di progetto sono orientati a rendere disponibile e operativo quello che sappiamo già ora sul forecast di breve termine ed incentivare ricerche che possano portare ad un miglioramento le conoscenze attuali. In particolare i macro-obiettivi sono due:

- 1) Sviluppo di un codice OEF (CASSANDRA) che fornisca una stima giornaliera e settimanale di probabilità di accadimento dei terremoti. Alla base di questo codice stanno modelli già sviluppati, ma finora mai verificati con procedure di validazione continue e sistematiche. Il codice fornirà in output i *forecast* di un modello *ensemble* che tenga conto di tutti i modelli a disposizione pesandoli in maniera opportuna a seconda delle capacità di *forecast* dei singoli modelli. Il codice fornirà anche una validazione in tempo reale dei modelli seguendo delle procedure di validazione stabilite da un benchmark internazionale.
- 2) Sviluppo di modelli di previsione probabilistica che permettano un miglioramento sostanziale dei modelli disponibili attualmente. I modelli possono o meno includere osservazioni definite come *precursori*. Questo obiettivo è molto ambizioso e non si può garantire un risultato finale che sia immediatamente operativo.

3. Interazioni con altri progetti e iniziative internazionali

Le attività previste per il raggiungimento degli obiettivi saranno in forte sinergia con progetti europei passati e in corso d'opera (FP6 SAFER, FP6 NERIES, Fp7 NERA, e Fp7 REAKT) e con l'iniziativa internazionale promossa dal *Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability* (CSEP) il cui scopo è quello di stabilire procedurem condivise per la validazione e per il confronto di modelli di previsione dei terremoti (vedi figura 1)

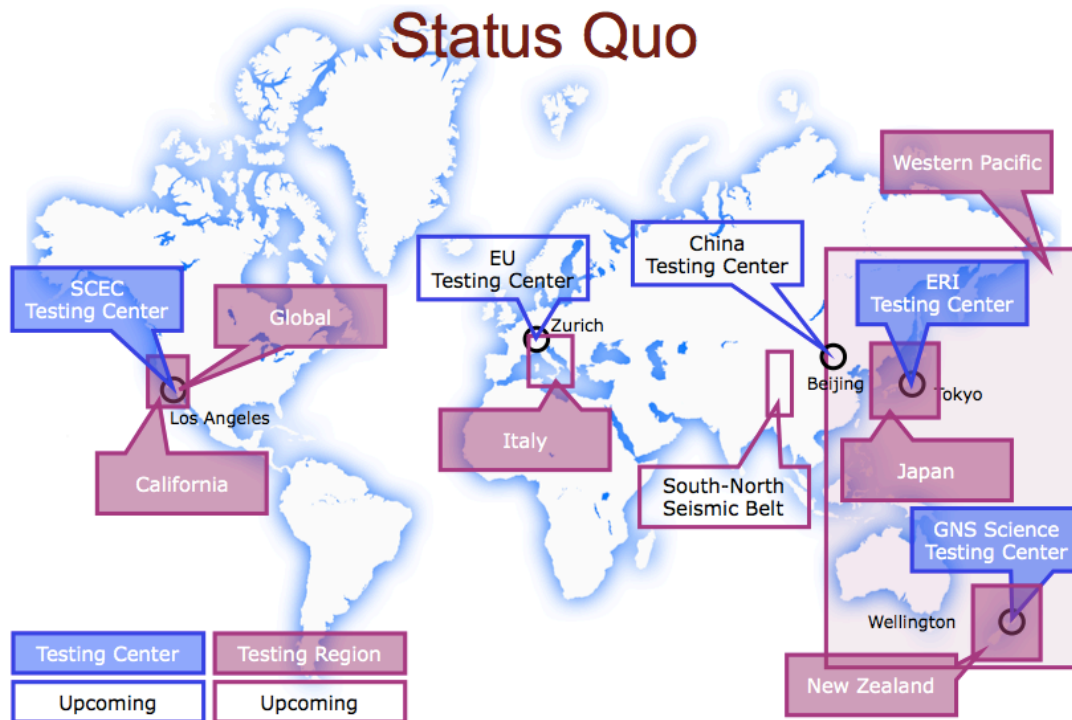


Figura 1: Aree in cui sono attualmente in corso esperimenti di validazione dei modelli di previsione dei terremoti in ambito CSEP. Le scatole rosse sono le testing regions, cioè le aree dove si intende prevedere l'evoluzione della sismicità. In blu sono rappresentate i testing centers dove vengono condotti gli esperimenti di validazione indipendentemente dagli autori dei modelli. I modelli finora in fase di valutazione sono più di 180. (www.cseptesting.org)

In questo modo si intende minimizzare le sovrapposizioni e sfruttare al massimo il *know-how* maturato in altri progetti e iniziative.

4. Stato dell'arte

Storicamente, l'approccio dominante per la previsione dei terremoti nel breve termine è stata quella definita del *silver bullet* (Jordan, 2006), cioè la ricerca del precursore diagnostico che permettesse di prevedere con elevata precisione l'accadimento di un forte terremoto. Tale ricerca è proseguita dagli anni settanta con fasi alterne, ma ancora oggi non esiste nessun precursore riconosciuto di questo tipo. Una review approfondita su questo argomento è riportata nel report della commissione internazionale per la prevedibilità dei terremoti nominata dalla Protezione Civile dopo il terremoto di L'Aquila nel 2009 (ICEF; Jordan et alii, 2011). Tuttavia, in questi anni i sismologi hanno imparato che la probabilità di accadimento dei terremoti nel breve termine può variare significativamente. L'esempio più eclatante è la sequenza sismica indotta da un terremoto di grande magnitudo, ma in generale si è visto che l'accadimento di ogni terremoto modifica la probabilità di averne altri in sequenza. Esistono modelli in grado di quantificare questi aumenti di probabilità (e.g. Kagan e

Knopoff, 1987; Ogata 1988; 1998; Reasenberg e Jones, 1989) che hanno mostrato una particolare capacità di prevedere probabilisticamente le sequenze di aftershocks (vedi Marzocchi e Lombardi, 2009 per la sequenza del terremoto di L'Aquila 2009). Questi modelli si basano su alcuni principi fisici e sfruttano solo le informazioni provenienti dai cataloghi sismici. Altre informazioni potenzialmente rilevanti, come conoscenze di dettaglio della fisica della sorgente, dei processi di nucleazione e di interazione tra le faglie così come informazioni derivanti dalla geologia o dall'osservazione di potenziali precursori, sono per ora escluse.

Nonostante i progressi nel campo della modellazione dei cluster sismici, non esiste a tutt'oggi nessun modello operativo utilizzato per la riduzione del rischio sismico, sia in Italia che nel resto del mondo (Jordan et alii, 2011).

5. Attività previste per il primo anno

Le attività previste per il primo anno si articolano in 3 task. Il primo è orientato a rendere disponibili e operativi i modelli basati sulle conoscenze attuali. Il secondo e il terzo sono maggiormente orientati allo sviluppo di ricerche sui modelli probabilistici e sui precursori con lo scopo finale di migliorare la capacità previsionale.

Task 1: Sviluppo di un codice per l'Operational Earthquake Forecasting

I primi modelli di previsione probabilistica di breve termine sono nati negli anni ottanta per analizzare l'evoluzione di una sequenza di aftershock. Questi modelli si basano principalmente sul cluster spazio-temporale dei terremoti e sono ancora usati proficuamente per questo scopo (vedi per esempio, Marzocchi e Lombardi, 2009, durante il terremoto di L'Aquila; vedi figura 2). I modelli più diffusi sono il modello ETAS (*Epidemic-Type Aftershock Sequences*; Ogata, 1988; 1998), il modello STEP (*Short-Term Earthquake Probability*; Gerstenberger et alii, 2005; vedi figura 3) e il modello Reasenberg e Jones (1989, 1990). Più recentemente si è notato che questi modelli sono adatti anche per stimare le probabilità di accadimento dei grandi terremoti (Helmstetter e Sornette, 2003; Felzer et alii, 2004; Christopherse e Smith, 2008; Zhuang et alii., 2008) poiché riproducono bene le statistiche dei foreshock osservate nei cataloghi reali (Marzocchi e Zhuang 2011; cf Reasenberg, 1999).

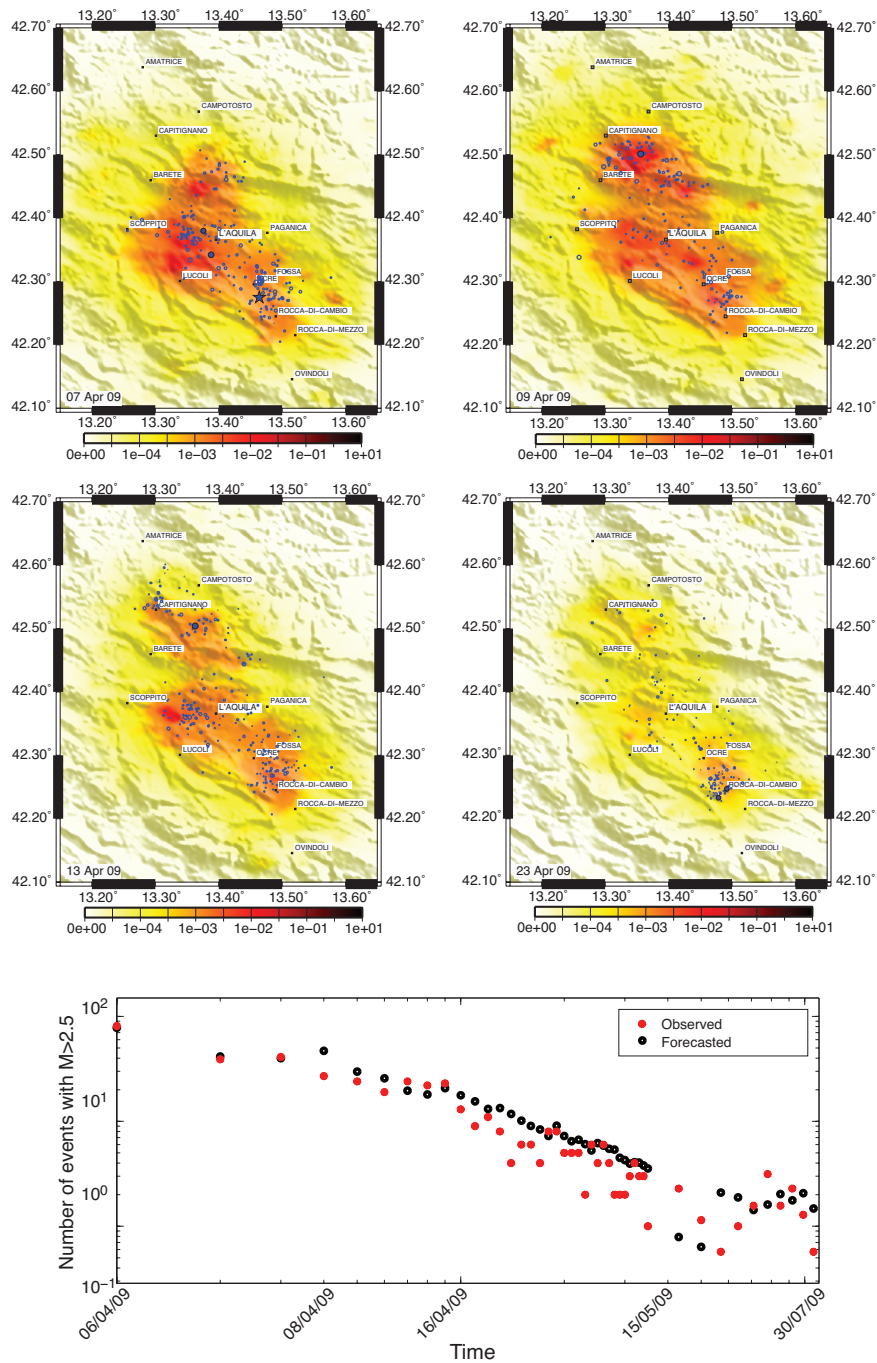


Figura 2: Confronto della sismicità giornaliera osservata e prevista dal modello ETAS che è stato utilizzato dopo il terremoto di L'Aquila (Marzocchi e Lombardi 2009). Le mappe riportano la densità di numero di eventi al giorno con M_l 4 o superiore per kilometro quadrato fornita dal modello ETAS. I pallini blu sono i terremoti con M_l 2.5 o superiore che sono avvenuti nell'intervallo di forecast; le loro dimensioni sono scalate con la magnitudo. Il grafico in basso riporta il numero di eventi osservati (punti rossi) e predetti (punti neri) per ogni giorno dalla data dell'evento principale (6 aprile 2009).

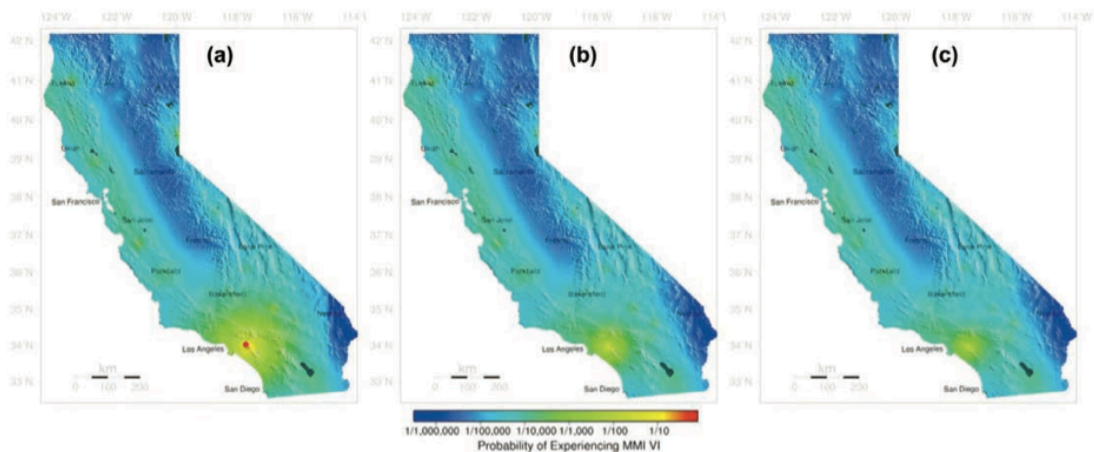


Figura 3: Previsione di breve termine con il modello STEP che, attraverso lo U.S. Geological Survey, pubblicava online le mappe di scuotimento atteso in California. Le mappe sono relative al forecast fornito dopo il terremoto di Chino Hills (M5.4) avvenuto il 29 Luglio 2008 alle 11:42 a Los Angeles. (a) mappa rilasciata alle 13:00. Il punto rosso indica la localizzazione del terremoto; le aree in giallo indicano aree dove la probabilità di superare una intensità VI è 10 volte maggiore rispetto al background (colore blu). (b) mappa rilasciata alle 13:00 del giorno successivo. (c) mappa pubblicata alle 13:00 del 1 agosto 2008, circa tre giorni dopo il terremoto. Il decremento di probabilità riflette l'andamento della legge di Omori.

Per l'Italia, esistono almeno tre modelli già disponibili, due versioni di modello ETAS (Lombardi e Marzocchi, 2010; Console et alii 2010), e uno STEP (Gerstenberger et alii, 2005). Un loro utilizzo operativo richiede alcuni passi fondamentali:

1. I modelli devono essere validati in maniera continua e con procedure di verifica condivise, sia utilizzando dati passati (test retrospettivi) che dati futuri (test prospettivi). A tale scopo si intende avvalersi delle procedure CSEP che stanno diventando un benchmark internazionale per la verifica e i confronti dei modelli di previsione dei terremoti su diverse scale temporali (REF). Questa attività è richiesta dalle raccomandazioni F1 e F2 della commissione internazionale.
2. Oltre alla verifica sperimentale dei modelli, le attività previste nel punto 1 sono di fondamentale importanza per la creazione di un modello *ensemble*. In questo modo si intende creare un modello che rappresenti pienamente le variabilità aleatorie e epistemiche. Recentemente, utilizzando alcuni esperimenti CSEP in California, Marzocchi et alii (2012) hanno dimostrato che i modelli ensemble hanno capacità previsionali superiori al modello migliore a disposizione. L'idea dei modelli ensemble è ampiamente utilizzata in tutti i campi dove occorre trovare un modello autoritativo come nel caso delle proiezioni dei cambiamenti climatici e come le stime di pericolosità sismica (il *logic tree* crea una sorta di modello *ensemble*).
3. Per l'utilizzo operativo dei modelli di *forecast* occorre che siano sviluppate procedure automatiche per la creazione dei *forecast* di ogni modello, per la valutazione statistica in tempo reale degli stessi, e per la creazione del modello di *ensemble*. Lo scopo è quello di creare una procedura che rilasci forecast

giornalieri e settimanali aggiornati ogni 3 ore. Inoltre si intende progettare un'interfaccia web che sia facile da interpretare e utilizzare.

4. Subito dopo un grande terremoto si ha una variazione significativa della magnitudo di completezza che può creare problemi ai *forecast* prodotti con il modello ETAS. Per tale scopo è opportuno sviluppare procedure automatiche che possano correggere i forecast tenendo conto dell'incompletezza dei cataloghi.

Task 2: Ricerche sui modelli probabilistici

I modelli di previsione probabilistica di breve termine sono sostanzialmente basati sulle informazioni del catalogo sismico e su pochi principi fisici come la legge di Omori che determina l'andamento temporale del trigger dei terremoti, la legge di Utsu che esprime la dipendenza del numero di eventi generati da un terremoto di magnitudo M , la legge di potenza del decadimento spaziale, e la legge di Gutenberg-Richter per descrivere la distribuzione probabilistica delle magnitudo. Alcune di queste leggi nacquero come leggi empiriche per poi essere giustificate dai modelli fisici.

Per ora, questi modelli non includono nessuna informazione proveniente dalla geologia, dalla fisica delle nucleazioni, e sui dettagli della fisica delle interazioni tra faglie. A tale scopo il progetto si propone di:

1. Sviluppare un modello probabilistico per includere eventualmente informazioni provenienti dalla geologia. Il problema è molto delicato perché occorre mantenere il modello di previsione di breve termine compatibile con i modelli di lungo termine. Per cui un tipo di operazione come questo richiede una stretta collaborazione con il progetto S1 e S2.
2. Studi sulla fisica dei sistemi complessi per studiare le caratteristiche dei cluster sismici che anticipano un evento di forte magnitudo. I modelli a disposizione finora (ETAS, STEP) assumono che i cluster sismici che possono anticipare grandi terremoti non abbiano particolari caratteristiche distintive. Esistono però alcuni recenti lavori che sembrano indicare delle caratteristiche peculiari che potrebbero essere utilizzate per migliorare le stime di previsione probabilistica.
3. Studio della fisica delle interazioni tra faglie per capire se e come inserire questa componente nei modelli probabilistici. I modelli a disposizione attualmente producono incrementi di probabilità che hanno una simmetria radiale nello spazio. La conoscenza della geometria delle faglie e della fisica dell'interazione tra faglie potrebbe portare ad una migliore definizione della geometria spaziale degli incrementi di probabilità. I lavori fatti finora sono molto pochi (Woessner et al., 2011) e i risultati sono ancora interlocutori.

Task 3: Ricerche sui transienti

La ricerca sui transienti o precursori rappresenta una ricerca con bassa probabilità di successo, ma con un potenziale alto impatto. La commissione internazionale (Jordan et alii, 2011), dopo avere rivisto un'ampia letteratura sul tema precursori, concludeva che

Although the search for diagnostic precursors should continue as a component of basic research, the Commission is not optimistic that diagnostic precursors will provide an operational basis for deterministic earthquake prediction in the near future. The best operational strategy is to accelerate the development of probabilistic earthquake forecasting.

Allo stato attuale non esiste nessuna ragionevole indicazione che possa suggerire una preferenza per un tipo di precursore piuttosto che un altro. Infatti, molte delle correlazioni proposte finora sono basate su analisi statistiche retrospettive e tali correlazioni non implicano necessariamente un rapporto di causa-effetto. Inoltre, la maggior parte dei modelli basati su precursori e transienti non sono formulati in una maniera verificabile sperimentalmente.

Per questo motivo, il progetto intende affrontare alcuni argomenti basandosi su alcuni vincoli: i) disponibilità di sufficienti dati per calibrare il modello; ii) ricerche innovative finora non affrontate, ma con solide basi fisiche; iii) formulazione di ipotesi e modelli che siano verificabili sperimentalmente; iv) scelta di transienti che diano risposte ragionevoli alle critiche sollevate nel report della commissione internazionale ICEF.

In particolare, il progetto si focalizzerà sui seguenti temi:

1. Sviluppo di metodi e procedure per l'analisi delle variazioni nella velocità di propagazione delle onde sismiche, come indicatori di variazione dello stato di sforzo in volumi di roccia interessati da processi sismogenetici. La velocità di propagazione delle onde sismiche è una funzione delle caratteristiche fisiche delle rocce da esse attraversate, che sono a loro volta dipendenti dalle condizioni di stress in cui le rocce si trovano. Variazioni nella velocità delle onde sismiche in un volume di rocce possono pertanto essere indicative della variazione del campo di sforzi cui tali rocce sono sottoposte, fenomeno che può preludere il verificarsi di un terremoto (Whitcomb et al., 1973).

Lo studio della sequenza sismica che ha preceduto il terremoto dell'Aquila, nell'Aprile 2009, ha consentito di evidenziare, a posteriori, la variazione delle proprietà elastiche delle rocce circostanti la faglia responsabile del terremoto durante la sua fase preparatoria (Lucente et al., 2010). In tale occasione sono state misurate importanti variazioni nella velocità di propagazione delle onde sismiche, il cui andamento temporale e spaziale è consistente con le diverse fasi evolutive di un processo di dilatanza e diffusione di fluidi, che avrebbe preceduto il verificarsi del terremoto (Scholz et al., 1973; Nur, 1972). Fenomeni diffusivi potrebbero inoltre aver determinato l'evoluzione della sequenza sismica nelle fasi successive al main-shock (Malagnini et al., 2012)

Tali osservazioni sono state possibili grazie alla densità di sismometri presenti nella zona interessata dal fenomeno sismico, conseguentemente alla buona qualità dei dati a disposizione che una volta non erano disponibili.

La rete sismica gestita dall'INGV, nella sua configurazione attuale (elevato numero di stazioni a 3 componenti, trasmissione dei dati in tempo reale), costituisce un potente strumento per la detezione e la caratterizzazione della sismicità in corso. Lo sviluppo di metodi e procedure in grado di gestire quantità rilevanti di dati, permetterebbe in prospettiva l'applicazione a scala nazionale e in tempo quasi reale, delle tecniche d'analisi utilizzate per lo studio della sequenza Aquilana. Tale analisi applicata retrospettivamente alle sequenze sismiche del passato contribuirà alla costruzione di un campione statistico su cui parametrare gli osservabili di volta in volta acquisiti.

La realizzazione di un tale sistema di osservazione e analisi potrebbe consentire di individuare l'insorgenza di variazioni nella velocità di propagazione delle onde sismiche negli stadi iniziali della fase di preparazione di eventuali terremoti medio-grandi, permettendo una più completa e tempestiva comprensione dell'entità del fenomeno sismogenetico in atto.

2. Implementazione di una rete permanente di monitoraggio in continuo di anomalie di emissione gassosa. Lo studio delle anomalie di emissione gassosa come possibile fenomeno precursore di eventi sismici risale ai primi anni settanta ed esistono decine di evidenze in tal senso censite in letteratura (si vedano Lomnitz et al 1994 e Cicerone et al 2009 per una review). Tratto comune virtualmente a tutte le evidenze positive raccolte fino ad ora è che si tratta di osservazioni *puntuali* sia in senso spaziale che in senso temporale caratterizzate da un approccio *Lagrangiano* al problema. Un aggettivo scientificamente non correttissimo ma dal potere sintetico molto elevato per riassumere i risultati di decine di lavori in proposito è *sporadico*.

Un salto di qualità nell'approccio a questo problema prevede il passaggio ad una logica *Euleriana* attraverso la realizzazione di una rete permanente di monitoraggio in continuo delle emissioni gassose da implementare nelle aree test del progetto. Da sottolineare che questo tipo di approccio diventa assolutamente imprescindibile se si vogliono utilizzare i risultati per la produzione di modelli di previsione che tengano conto anche di questi segnali transienti come richiesto dal punto a.3.2.

Una rete di monitoraggio siffatta non esiste in nessuna forma sul territorio nazionale.

Per la realizzazione di una rete di strumenti in grado di garantire il monitoraggio completo delle aree test previste dal progetto sono necessarie almeno alcune decine di stazioni di misura. Il "tradizionale" approccio geochimico al problema prevede la realizzazione di stazioni di analisi in continuo di acque sotterranee e di sorgente. Questo tipo di approccio soffre di tre problemi maggiori:

- 1) lo sviluppo di tali stazioni è a livello ancora prototipale e non standardizzato: Questo impedisce il soddisfacimento degli obiettivi temporali del progetto;
- 2) L'installazione di ogni stazione è molto complessa: Questo impedisce il soddisfacimento degli obiettivi temporali del progetto

- 3) Il costo di realizzazione e installazione di questo tipo di prodotto è dell'ordine minimo di parecchie decine di keuro a stazione: Questo non è compatibile con i limiti finanziari del progetto.

Intendiamo proporre la realizzazione di una rete di monitoraggio di anomalie di emissione dei gas radioattivi nei suoli utilizzando rivelatori alfa di recente ingegnerizzazione e di facile installazione che permetterebbe il soddisfacimento degli obiettivi sia temporali che finanziari del progetto. Infatti poiché l'ingegnerizzazione dei rivelatori utilizzati è già completamente standardizzata è ragionevole preventivare la produzione e l'installazione di almeno venti stazioni di misura in pochi mesi. Il costo, comprensivo di installazione, di ogni stazione è inferiore ai 5 keuro garantendo il rispetto dei limiti finanziari del progetto.

3. NOTA: ci sono altri aspetti relativi agli esperimenti di laboratorio sulla meccanica delle fratture e i precursori associati che sono ancora in fase di definizione

6. Prodotti attesi

1. CASSANDRA v01. Si tratta del primo codice predisposto per l'*Operational Earthquake Forecasting* da utilizzare durante sequenze sismiche su tutto il territorio italiano
2. Modelli di nuova generazione per la previsione probabilistica dei terremoti. Tali modelli saranno basate su conoscenze geologiche, fisiche e/o osservazioni di transienti e precursori. Tutti i modelli proposti saranno in un formato verificabile sperimentalmente e validati almeno retrospettivamente
3. Prototipo di una rete permanente di monitoraggio in continuo di anomalie di emissione gassosa

Bibliografia

- Agnew, D. C., and L. M. Jones (1991), Prediction probabilities from fore- shocks, *J. Geophys. Res.*, 96, 11,959-11,971.
- Christophersen, A., and E. G. C. Smith (2008), Foreshock rates from after- shock abundance, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, 2133-2148,
- Console, R., M. Murru, and G. Falcone (2010). Probability gains of an epidemic-type aftershock sequence model in retrospective forecasting of $M > 5$ earthquakes in Italy, *J. Seismology*, 14, 9-26.
- Felzer, K. R., R. E. Abercrombie, and G. Ekström (2004), A common origin for aftershocks, foreshocks, and multiplets, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, 88-98.
- Gerstenberger, M., S. Wiemer, L. M. Jones, and P. A. Reasenber (2005), Real-time forecasts of tomorrow's earthquakes in California, *Nature*, 435, 328-331.
- Helmstetter, A., and D. Sornette (2003), Foreshocks explained by cascades of triggered seismicity, *J. Geophys. Res.*, 108(B10), 2457, doi:10.1029/ 2003JB002409.
- Jordan, T. H. (2006). Earthquake predictability, brick by brick. *Seismological Research Letters* 77(1), 3-6.
- Jordan, T. H., and L. M. Jones (2010), Operational earthquake forecasting: Some thoughts on why and how, *Seismol. Res. Lett.*, 81, 571–574.
- Jordan, T. H., Y.-T. Chen, P. Gasparini, R. Madariaga, I. Main, W. Marzocchi, G. Papadopoulos, G. Sobolev, K. Yamaoka, and J. Zschau (2011). Operational Earthquake Forecasting: State of Knowledge and Guidelines for Utilization. *Ann. Geophys.*, **54**, 315-391, doi:10.4401/ag-5350
- Kagan, Y., and L. Knopoff (1987), Statistical short-term earthquake prediction, *Science*, 236, 1563-1567.
- Lombardi A.M., W. Marzocchi (2010). The ETAS model for daily forecasting of Italian seismicity in the CSEP experiment. *Ann. Geophys.*, **53**, 155-164.
- Lombardi, A. M., M. Cocco, and W. Marzocchi (2010), On the increase of background seismicity rate during the 1997-1998 Umbria-Marche (central Italy) sequence: Apparent variation or fluid-driven triggering?, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 1138-1152.
- Lucente, F.P., De Gori, P., Margheriti, L., Piccinini, D., Bona, M.D., Chiarabba, C., and Agostinetti, N.P., 2010, Temporal variation of seismic velocity and anisotropy before the 2009 MW 6.3 L'Aquila earthquake, Italy: *Geology*, v.38, p. 1015–1018, doi: 10.1130/G31463.1.
- Malagnini, L., Lucente, F.P., De Gori, P., Akinci, A., and Munafò, I., 2012, Control of pore fluid pressure diffusion on fault failure mode: Insights from the 2009 L'Aquila seismic sequence, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JB008911
- Marzocchi, W., and A. M. Lombardi (2009), Real-time forecasting following a damaging earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L21302, doi:10.1029/2009GL040233.

- Marzocchi, W., D. Schorlemmer, and S. Wiemer (2010), Preface to the special volume: An earthquake forecast experiment in Italy, *Ann. Geophys.*, 53, III–VIII.
- Marzocchi W., J.D. Zechar, T.H. Jordan (2012). Bayesian forecast evaluation and ensemble earthquake forecasting. Submitted to *Bull. Seismol. Soc. Am.*
- Michael, A. J., and L. M. Jones (1998), Seismicity alert probabilities at Parkfield, California, revisited, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88, 117–130. Michael, A. J. (2011), Fundamental questions of earthquake statistics, source behavior, and the estimation of earthquake probabilities from possible foreshocks, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, in press.
- Miller, S. A., C. Collettini, L. Chiaraluce, M. Cocco, M. Barchi, and B. J. P. Kaus (2004), Aftershocks driven by a high-pressure CO₂ source at depth, *Nature*, 427, 724–727.
- Nur, A., 1972, Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of travel times: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 78, p. 1217–1222.
- Ogata, Y. (1988), Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J. Am. Stat. Assoc.*, 83, 9–27.
- Reasenber, P. A. (1999), Foreshock occurrence rates before large earthquakes worldwide, *Pure Appl. Geophys.*, 155, 355–379.
- Reasenber, P. A., and L. M. Jones (1989), Earthquake hazard after a main-shock in California, *Science*, 243, 1173–1176.
- Scholz, C.H., Sykes, L.R., and Aggarwal, Y.P., 1973, Earthquake prediction: A physical basis: *Science*, v. 181, p. 803–809, doi: 10.1126/science.181.4102.803.
- van Stiphout, T., S. Wiemer, and W. Marzocchi (2010), Are short-term evacuations warranted? Case of the 2009 L’Aquila earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L06306, doi:10.1029/2009GL042352.
- Whitcomb, J.H., Garmany, J.D., and Anderson, D.L., 1973, Earthquake prediction: Variation of seismic velocities before the San Fernando earthquake: *Science*, v. 180, p. 632–635, doi: 10.1126/science.180.4086.632.
- Woessner, J., S. Hainzl, W. Marzocchi, M. J. Werner, A. M. Lombardi, F. Catalli, B. Enescu, M. Cocco, M. C. Gerstenberger, and S. Wiemer (2011), A retrospective comparative forecast test on the 1992 Landers sequence, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JB007846, in press.
- Woo, G. (2010), Operational earthquake forecasting and risk management, *Seismol. Res. Lett.*, 81, 778–782.
- Zhuang, J., A. Christophersen, M. K. Savage, D. Vere-Jones, Y. Ogata, and D. D. Jackson (2008), Differences between spontaneous and triggered earthquakes: Their influences on foreshock probabilities, *J. Geophys. Res.*, 113, B11302, doi:10.1029/2008JB005579.