

Bozza Progetto S3 – a cura di Vincenzo LAPENNA

S3 - Previsione a breve termine e preparazione dei terremoti

Questo tema punta ad un avanzamento delle conoscenze, relative: i) allo sviluppo di modelli di previsione probabilistica a breve termine, in particolare al loro confronto, validazione e applicabilità operativa per azioni di protezione civile; ii) al processo di generazione dei terremoti ed alla loro predicibilità. Per quanto riguarda questi ultimi aspetti, sono promossi quegli studi in grado di contribuire alla comprensione del processo di generazione dei terremoti e che potrebbero condurre a risultati con implicazioni per la previsione probabilistica operativa (ad esempio: variazioni delle caratteristiche fisiche delle rocce, deformazioni crostali, anisotropia sismica, anomalie geochimiche od elettromagnetiche).

Ulteriore obiettivo è quello di verificare i livelli di affidabilità ed efficacia dei modelli considerati a scopi operativi rispetto a consolidati modelli di riferimento, quali i modelli a lungo termine indipendenti dal tempo. Il fine ultimo è che il DPC possa valutare la realizzabilità di un processo di implementazione di protocolli per la trasposizione di previsioni probabilistiche a breve termine in azioni di protezione civile (ad esempio: soglie/azioni; contenuto e modalità di comunicazione delle informazioni verso l'esterno; ecc.).

Sintesi della Proposta Progettuale

La sfida scientifica che il progetto intende affrontare in un arco temporale di 3 anni è lo studio dei precursori sismici della previsione sismica a breve termine mediante un approccio misto “statistico-probabilistico e fisico-deterministico”.

Nell'ultimo decennio da un lato vi è stato un aumento esponenziale di lavori scientifici inerenti l'osservazione e l'analisi di precursori geofisici e geochimici, dall'altro vi è stata una significativa sequenza di eclatanti annunci e moltissimi fallimenti nell'utilizzo di fenomeni precursori nella previsione sismica a breve termine. Le analisi effettuate quasi sempre *ex-post*, anche se in molti casi basate su moderne metodologie statistiche per l'individuazione di segnali anomali, non hanno contribuito ad un significativo avanzamento delle conoscenze ed in molti casi hanno generato allarmi ingiustificati.

Il *rationale* della proposta non è uno studio generico sull'ampio spettro di fenomeni precursori o valutazioni di tipo statistico sulla probabilità di occorrenza di segnali anomali di natura geofisica o geochimica, ma si fonda su di uno studio rigoroso e sistemico dei principali osservabili correlati con la migrazione dei fluidi nelle aree focali. Alla base della proposta vi è l'assunzione fondamentale che il ruolo dei fluidi presenti sottosuolo è cruciale per migliorare le attuali conoscenze sulla fisica dei terremoti e che la loro migrazione produce *osservabili* che possono essere misurati con procedure e tecniche sperimentali ben consolidate.

Gli osservabili che saranno studiati nelle aree test sono la microsismicità locale, il rapporto V_p/V_s , la resistività elettrica ρ delle rocce, le emissioni di CO_2 ed altri gas serra e le anomalie termiche superficiali. L'insieme di questo sistema di *osservabili* sarà acquisito con procedure standard e sarà costituito un geodatabase per la completa condivisione ed interoperabilità dei dati. La standardizzazione delle misure, la metadattazione e la completa

fruibilità dei dati da parte della comunità scientifica, anche alla luce di quanto previsto dall'iniziativa europea INSPIRE, sarà una caratteristica fondamentale della proposta.

La necessità di definire un numero ben definito di attività ed osservazioni sperimentali con una forte focalizzazione degli obiettivi realizzativi della proposta risponde anche all'esigenza di concentrare le risorse economiche ed ottenere risultati e prodotti di interesse per il DPC già nel primo anno di attività.

Il popolamento del geodatabase mediante tecniche standard, validate, calibrate e condivise dalla comunità scientifica è fondamentale per costruire nel tempo una base di dati geofisici affidabili per: a) sviluppare modelli e sistemi per l'analisi in tempo reale delle correlazioni tra le diverse tipologie di osservabili; b) individuare pattern anomali potenzialmente correlati con la variazione del ciclo sismico nelle aree test e c) sviluppare e validare modelli innovativi per la previsione sismica a breve termine.

Principali aspetti innovativi

Il progetto pertanto propone una visione sistemica ed innovativa per l'analisi di un set limitato e ben definito di precursori sismici. In sintesi i principali pilastri scientifici della proposta sono:

- l'applicazione di tecniche tomografiche 2D, 3D e 4D per la caratterizzazione geofisica delle strutture tettoniche e lo sviluppo di modelli per lo studio migrazione dei fluidi nelle aree focali;
- lo sviluppo e l'implementazione operativa di sistemi osservativi con sensori, sia in-situ che da satellite, con caratteristiche di multirisoluzione spaziale, temporale e spettrale per la misura di osservabili in due aree sismicamente attive (Appennino Calabro-Lucano, Pianura Padana);
- lo sviluppo e l'applicazione di metodi statistici innovativi per l'individuazione tempestiva in *near real time* (non studi retrospettivi e/o a ex-post) di fenomeni di *clustering* spazio-temporale nei segnali geofisici misurati.

Oltre per gli aspetti prettamente scientifici la proposta si caratterizza anche per l'utilizzo di tecnologie innovative:

- array di reti sismiche per la stima delle var rapporto V_p/V_s ;
- sensori satellitari passivi ad elevata risoluzione temporale (AVHRR, MODIS, SEVIRI);
- array di reti di stazioni magnetotelluriche per la stima delle variazioni della resistività elettriche delle rocce nel range di profondità (0-10km).

Collegamenti con programmi e progetti internazionali

L'integrazione di reti sismometriche di misura al suolo e reti di stazioni magnetotelluriche è attualmente uno degli obiettivi di alcuni dei più importanti progetti internazionali nel settore delle Scienze della Terra (EarthScope-USA, SinoProbe-Cina).

L'utilizzo di sistemi osservativi satellitari con caratteristiche di multi risoluzione spaziale, temporale e spettrale è in linea con quanto previsto dal programma GEOSS (Global Earth Observing System of Systems).

Questa proposta è in linea con quanto proposto dalla Commissione Europea che, per la prima volta, nell'ambito del Settimo Programma Quadro, ha finanziato due progetti PRE-EARTHQUAKES e SEMEP (dei quali uno a coordinamento italiano) finalizzati al miglioramento della conoscenza dei meccanismi preparatori degli eventi sismici attraverso l'integrazione sistematica di osservazioni eterogenee ed indipendenti. Inoltre le attività progettuali presentano possibili sinergie con altri progetti europei FP7 finalizzati alla mitigazione del rischio sismico (es. MATRIX, REAKT).

Infine si sottolinea come le attività previste potranno contribuire al programma internazionale CSEP – *Collaboratory for the Study of Earthquake Prediction*.

Principali risultati e prodotti attesi (I Anno)

Il progetto sarà strutturato in modo da coniugare un duplice obiettivo, ovvero quello di definire una strategia a medio termine (3 anni) per ottenere un avanzamento delle conoscenze significativo nel settore della previsione sismica a breve termine e quello di fornire dei risultati e dei prodotti di interesse per il DPC già a partire dal primo anno.

Pertanto le attività previste per il primo anno saranno fortemente orientate alla rilevazione sistematica e degli osservabili nella prima area test individuata: l'Appennino Calabro-Lucano. Mentre solo nel secondo anno si prevede di avviare le attività nella seconda area test. I principali risultati attesi per il primo anno sono:

- Definizione di un set di procedure sperimentali standard, validate e condivise dalla comunità scientifica nazionale ed internazionale per la misura dei principali osservabili geofisici direttamente o indirettamente correlati con la migrazione dei fluidi nelle aree focali;
- Realizzazione di infrastruttura di dati sismologici, geofisici e geochimici nell'area test dell'Appennino Calabro-Lucano condivisa, interoperabile e fruibile alla comunità scientifica internazionale;
- Analisi di fattibilità per un eventuale utilizzo di osservazioni di possibili precursori all'interno di modelli di previsione probabilistica a breve termine;
- Redazione di rapporti per il DPC sulle *performances* di sistemi pre-operativi di misura ed analisi *real time* di fenomeni precursori con individuazione dei *gaps* scientifici e tecnologici.

Area test per il primo anno di attività: Appennino Calabro-Lucano

L'area test comprende la zona al confine calabro-lucano definita dalla catena montuosa del Pollino (Appennino meridionale). Quest'area negli ultimi anni è stata interessata da diversi periodi di sciami sismici intervallati da periodi di relativa calma. In particolare, i picchi di massima attività si sono avuti ad Aprile 2010, a Ottobre 2010 e tra Novembre e Dicembre 2011.

Il contesto geologico strutturale dell'area test è piuttosto complesso per la presenza di un importante elemento tettonico regionale rappresentato da un sistema di faglie trascorrenti sinistre (Tortorici et al., 1995) legate alla Linea del Pollino (Ghisetti & Vezzani, 1983). Questo tratto della Catena Appenninica è stato progressivamente interessato prima da forti raccorciamenti (Miocene-Pliocene) producendo una serie di falde di ricoprimento disposte con una struttura di tipo duplex, successivamente, ad iniziare dal passaggio Pliocene-Pleistocene da una tettonica distensiva che ha generato un sistema segmentato

di faglie a direzione prevalente NW-SE, lungo il quale si sono sviluppate depressioni tettoniche, le più importanti delle quali sono rappresentate dai bacini pleistocenici del Mercure e di Morano - Castrovillari.

Gli studi paleosismologici lungo le faglie bordiere di questi due bacini e la recente attività sismica che sta interessando l'area, indicano che la tettonica distensiva è tuttora attiva.

Recentemente proprio nell'ambito di un progetto in collaborazione con il DPC, il CNR-IMAA ha condotto delle tomografie geoelettriche del sottosuolo ottenendo delle Tomografie di Resistività elettrica (ERT) proprio in prossimità dell'area epicentrale dello sciame sismico che ormai da due anni sta interessando il Pollino al fine di valutare la presenza di discontinuità tettoniche attribuibili alla faglia generatrice dei terremoti.

Riferimenti bibliografici

- Tortorici L., Monaco C., Tansi C., Cocina O. (1995) – Recent and active tectonics in the Calabrian Arc (Southern Italy). *Tectonophysics*, 243, 37-55.
- Ghisetti F., Vezzani L. (1983): Structural map of Mt. Pollino (Southern Italy). Scala 1:50.000, SELCA, Firenze.

Linea di Ricerca S3-1. *Integrazione di tomografie sismiche e tomografie elettromagnetiche superficiali e profonde per lo studio di fluidi in aree sismicamente attive.*

a.1. motivazioni/scopi

Il progetto si propone di ottenere informazioni sull'assetto geologico-strutturale superficiale e profondo di aree sismogenetiche, mediante l'uso integrato di metodologie di prospezione geofisica elettriche ed elettromagnetiche con tomografie sismiche 3D ad alta risoluzione. In particolare, l'approccio multi-risoluzione (da qualche metro a qualche km di profondità) mediante le diverse tecniche tomografiche di prospezione geofisica permetterebbe di ottenere utili informazioni sull'individuazione e le caratteristiche geometriche e fisiche di possibili strutture sismogenetiche, contribuendo, in tal modo, alla comprensione dei meccanismi di generazione dei terremoti con implicazioni anche in studi di previsione.

a.2. conoscenze pregresse

Osservazioni di campagna e recenti esperimenti di laboratorio indicano una diminuzione significativa della frizione lungo il piano di scorrimento di una faglia sismica (lubrificazione della faglia) (Di Toro et al., 2011). Tale meccanismo sembra essere dovuto all'azione combinata di diversi processi fisici, alcuni non ancora completamente compresi. Un ruolo importante sembra avere la presenza di fluidi termali pressurizzati profondi entro la zona di faglia che potrebbe ridurre lo stress normale ed innescare un regime di scorrimento (Rice, 2006). La presenza di fluidi nell'area di enucleazione di un terremoto rende inoltre il processo di rottura molto efficiente (elevata efficienza sismica) perché la maggior parte dell'energia prodotta viene irradiata a causa della riduzione del coefficiente di attrito dinamico dovuta alla diffusione dei fluidi nella roccia. La presenza ed il movimento di tali fluidi profondi entro la zona di faglia, nello stadio di preparazione di un terremoto, può innescare una serie di anomalie in alcuni parametri geoelettrici, quali il potenziale elettrocinetico (streaming potential) e la resistività elettrica (Revil et al., 2008; Improta et al., 2010; Siniscalchi et al., 2010; Zhdanov et al., 2011). Il movimento di fluidi profondi può generare inoltre variazioni del rapporto V_p/V_s (Scholz et al., 1973; Becken et al., 2011) tra la velocità delle onde sismiche compressive (onde P) e di taglio (onde S). L'analisi delle variazioni di tale parametro ha giocato un ruolo importante nello studio della fase

preparatoria del terremoto de L'Aquila, consentendo di ipotizzare un modello di migrazione di fluidi che ha favorito l'innesco del terremoto (Lucente et al., 2010).

a.3. metodologie/prodotti attesi

Il progetto vedrà l'applicazione integrata di metodologie di prospezioni elettriche ed elettromagnetiche, quali il metodo del Potenziale Spontaneo (SP), la Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) ad alta risoluzione superficiale e profonda, il metodo Magnetotellurico (MT), con diverso potere risolutivo e profondità di esplorazione, per la caratterizzazione geologico-strutturale di faglie attive in aree sismogenetiche. L'integrazione dei risultati con tomografie sismiche consentirà inoltre di analizzare le aree investigate attraverso un approccio multi-parametrico che migliorerà la conoscenza delle caratteristiche fisiche e geometriche del mezzo grazie all'utilizzo di diversi osservabili fisici. I prodotti dell'attività di ricerca consisteranno in profili, mappe e sezioni elettriche dell'andamento spaziale del potenziale elettrico e/o della resistività elettrica (resistivity imaging), effettuati trasversalmente alle supposte strutture sismogenetiche, e di immagini tomografiche tridimensionali ad alta risoluzione delle velocità delle onde P e S e del loro rapporto. Successivamente le immagini tomografiche sismiche e di resistività elettrica saranno interpretate congiuntamente in termini di sezioni geologico-strutturali con indicazione della presenza di eventuali faglie e di zone a maggior/minor contenuto di fluidi. L'integrazione dei nuovi dati con quelli acquisiti nell'ambito di precedenti progetti permetterà di ottenere per la prima volta un modello 3D di resistività a scala crostale dell'Appennino Calabro-Lucano la cui interpretazione può fornire indicazioni per l'individuazione di eventuale migrazione di fluidi nella regione sismogenetica (Becken et al., 2011). Tali indicazioni potranno essere ulteriormente avallate dai risultati delle tomografie sismiche, con particolare riguardo a quelli relativi alla distribuzione spaziale e temporale del rapporto V_p/V_s .

a.4. applicabilità-fruibilità immediata (da parte di DPC)

I prodotti ottenuti (profili, mappe, sezioni) e le informazioni di carattere geologico-strutturale, stratigrafico ed idrogeologico associate potranno essere utilizzati dagli enti di ricerca e dal DPC per la modellazione sia del sottosuolo, per la stima della risposta sismica locale, nell'ambito della Microzonazione Sismica, sia delle strutture sismogenetiche, in studi inerenti i meccanismi di generazione dei terremoti con ricadute teorico-applicative anche in ambito previsionale.

a.5. riferimenti bibliografici

- Rice J.R. (2006). Heating and weakening of faults during earthquake slip. *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 111, B05311, doi:10.1029/2005JB004006, 2006.
- Revil A., Finizola A., Piscitelli S., Rizzo E., Ricci T., Crespy A., Angeletti B., Balasco M., Barde Cabusson S., Bennati L., Byrdina S., Carzaniga N., Di Gangi F., Morin J., Perrone A., Rossi M., Roulleau E., Suski B. and A. Bolève (2008). The inner structure of La Fossa di Vulcano (Vulcano Island, southern Tyrrhenian Sea, Italy) revealed by high resolution electric resistivity tomography coupled with self-potential, temperature, and soil CO₂ gas measurements. *Journal of Geophysical Research*, 113, B07207, doi:10.1029/2007JB005394.
- Improta L, Ferranti L, De Martini PM, Piscitelli S., Bruno PP, Burrato P, Civico R, Giocoli A, Iorio M, D'addezio G, Maschio L (2010). Detecting young, slow-slipping active faults by geologic and multidisciplinary high-resolution geophysical investigations: A case study from the Apennine seismic belt, Italy. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, vol. 115; p. B11307, ISSN: 0148-0227, doi:

- 10.1029/2010JB000871.
- Lucente F. P., De Gori P., Margheriti L., Piccinini D., Di Bona M., Chiarabba C., Agostinetti N. P. (2010). Temporal variation of seismic velocity and anisotropy before the 2009 MW 6.3 L'Aquila earthquake, Italy. *Geology*, 38(11), p. 1015-1018, doi: 10.1130/G31463.1
 - Siniscalchi A, Tripaldi S, Neri M, Giammanco S, Piscitelli S., Balasco M, Behncke B, Magrì C, Naudet V. and Rizzo E (2010). Insights into fluid circulation across the Pernicana Fault (Mt. Etna, Italy) and implications for flank instability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 193; p. 137-142, ISSN: 0377-0273, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.03.013.
 - Scholz C.H., Sykes L.R., and Aggarwal Y.P. (1973). Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, 181, p. 803–809, doi: 10.1126/science .181.4102.803.
 - Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M. and Shimamoto T. (2011). Fault lubrication during earthquakes. *Nature*, 471, 494–498, (24 March 2011), doi:10.1038/nature09838.
 - Zhdanov M.S., Smith R.B., Gribenko A., Cuma M. and Green M. (2011). Three dimensional inversion of large-scale EarthScope magnetotelluric data based on the integral equation method: Geoelectrical imaging of the Yellowstone conductive mantle plume. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L08307, doi:10.1029/2011GL046953, 2011.
 - Becken M., Ritter, O., Bedrosian, P.A., and Weckmann, U., 2011. Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault. *Letter to Nature*.

Linea di Ricerca S3-2. *Tecniche multispettrali di telerilevamento satellitare mediante sensori passivi operanti nel visibile ed infrarosso termico in aree sismicamente attive.*

a.1. motivazioni/scopi

Lo sviluppo di tecnologie osservative e di sistemi multi-sorgente, multi-risoluzione spaziale e spettrale e multi-frequenza (basati sull'integrazione di sensori alloggiati su piattaforme aviotrasportate e satellitari, di reti di misura distribuite al suolo, di sistemi mobili per misure in-situ) ha aperto nuove frontiere nello sviluppo di prodotti e servizi innovativi per il monitoraggio di aree ad elevato rischio naturale (es. sismico, idrogeologico). E' attualmente possibile integrare osservazioni sistematiche effettuate con sensori alloggiati su piattaforme satellitari con dati geofisici e geochimici misurati da reti di misura al suolo. Uno delle sfide scientifiche più interessanti nel campo della previsione sismica a breve termine consiste nello studio delle possibili correlazioni tra anomalie termiche superficiali rilevate da satellite, emissioni di gas e/o movimenti di fluidi ed attività sismica.

a.2. conoscenze pregresse

Le tecnologie di telerilevamento da satellite con sensori nel visibile e nell'infrarosso termico sono strumenti consolidati per l'individuazione di anomalie termiche superficiali associate a fuoriuscita di lava, gas, cenere, vapor acqueo e risalite di fluidi in ambienti vulcanici. Sia in ambito internazionale che nazionale sono stati effettuati studi e progetti che hanno dimostrato l'efficacia di questo approccio anche in un contesto pre-operativo. Queste tecnologie possono essere adeguatamente sperimentate anche nel monitoraggio di strutture sismogeniche, la maggior complessità ed estrema variabilità della dinamica spazio-temporale dei fenomeni sismici rende però necessario osservazioni sistematiche

su lungo periodo (almeno un anno) e la calibrazione e validazione dei dati satellitari con reti al suolo ed in particolare con misure geochimiche.

a.3 metodologie/prodotti attesi

Mappe giornaliere di anomalie termiche superficiali TIR (Thermal Infrared) in una delle due aree test (Pianura Padana e Appennino Calabro- Lucano) ed analisi delle deviazioni standard delle radianze di cielo sereno nella regione spettrale (finestra atmosferica) 10-12 micron (TIR) in diverse condizioni di copertura vegetazionale e di osservazione.

Mappe giornaliere di anomalie nelle concentrazioni atmosferiche di gas serra (CO₂, CH₄) mediate l'utilizzo di interferometri infrarossi (es. IASI, AIRS).

Confronto ed analisi delle possibili correlazioni tra variazioni nella dinamica spazio-temporale della sismicità locale, emissioni di CO₂ e anomalie termiche rilevate da satellite.

a.4. applicabilità-fruibilità immediata (da parte di DPC)

Individuazione tempestiva (early-warning) di zone interessate da emissioni anomale di gas e/o movimenti di fluidi.

a.5. riferimenti bibliografici

- Tronin, A. A. Thermal IR satellite sensor data application for earthquake research in China, *International Journal of Remote Sensing*, 21(16), 3169–3177, (2000).
- N. Pergola, F. Marchese, V. Tramutoli. Automated detection of thermal features of active volcanoes by means of Infrared AVHRR records. *Remote Sensing of Environment*, Volume 93, Issue 3, pp. 311-327, (2004).
- Tramutoli, V., Cuomo, V., Filizzola, C., Pergola, N., Pietrapertosa, C. Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas. The case of Kocaeli (Ýzmit) earthquake, August 17th, 1999. *Remote Sensing of Environment*, Volume 96, Issues 3-4, pp. 409-426 (2005).
- Saraf, A.K., Choudhury, S.,. Satellite detects surface thermal anomalies associated with the Algerian earthquakes of May 2003. *International Journal of Remote Sensing* 26 (13), 2705–2713 (2005).
- Pieri, D. and Abrams, M., 2005. ASTER observations of thermal anomalies preceding the April 2003 eruption of Chikurachki volcano, Kurile Islands, Russia. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 99, Issue 1-2, 84-94 (2005).
- Genzano N., Aliano C., Filizzola C., Pergola N., Tramutoli V., 2007. A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: the case of Bhuj - Gujarat earthquake. *Tectonophysics*, 431, 197-210, (2007).

Linea di Ricerca S3-3. Sviluppo ed applicazione di metodi e modelli statistici per la caratterizzazione dinamica di osservabili geofisiche e sismicità nelle aree test.

a.1. motivazioni/scopi

Lo studio di segnali geofisici e geochimici (es. rapporto V_p/V_s, livello di acqua, emissioni elettromagnetiche) misurati in aree ad intensa attività sismica insieme a parametri direttamente o indirettamente legati alla dinamica spazio-temporale di sismicità possono contribuire non solo a caratterizzare dinamicamente i processi tettonici ma anche a costruire modelli statistico-probabilistici di occorrenza di eventi sismici. Lo scopo

fondamentale della ricerca è migliorare e raffinare il livello di conoscenza della dinamica di segnali precursori e la loro interazione con le strutture litosferiche in zone sismicamente attive, attraverso l'applicazione di metodi statistici avanzati.

a.2. conoscenze pregresse

Recentemente, approfondite analisi della dinamica spazio-temporale della sismicità sono state condotte usando diverse metodologie statistiche che hanno rivelato la proprietà di time-clustering e di correlazione temporale tra gli eventi sismici, che hanno evidenziato la proprietà di non estensività in sequenze sismiche (Uyeda et al., 2009; Telesca and Lovallo, 2009; Telesca and Lovallo, 2012; Telesca, 2010; Telesca, 2012), dimostrando come la rigorosa applicazione di metodologie robuste per l'analisi delle proprietà dinamiche dei segnali possa avere implicazioni sulla possibilità di rivelare pattern precursori. Inoltre l'applicazione di tecniche statistiche innovative ha consentito l'identificazione di anomalie geofisiche prima dell'occorrenza di eventi estremi (Telesca et al., 2010), o anomalie geochimiche pre- e co-sismiche (Heinicke et al., 2010).

a.3. metodologie/prodotti attesi

La ricerca consisterà nelle seguenti fasi: i) creazione di un idoneo database osservazionale di dati geofisici, geochimici e sismici nelle aree test; ii) sviluppo e applicazione di avanzate metodologie statistiche per l'analisi dati; iii) analisi di variazioni dinamiche spazio-temporali nei segnali misurati e nella distribuzione della sismicità regionale; iv) analisi di correlazioni tra le variazioni di segnali geofisici misurati nelle aree test e la sismicità locale; v) sviluppo di una base teorica per spiegare i meccanismi che governano i fenomeni geofisici legati all'attività sismica e associati ad anomalie precursori; vi) possibile assessment di criteri quantitativi per riconoscere segnali precursori.

a.4. applicabilità-fruibilità immediata (da parte di DPC)

I prodotti che possono scaturire nel primo anno della ricerca sono lo sviluppo e l'applicazione di tecniche statistiche e modelli a sequenze sismiche e a serie storiche di segnali geofisici misurati in aree sismiche e la redazione di rapporti e/o documenti per valutare una eventuale applicabilità di tali tecniche in ambito operativo.

a.5. riferimenti bibliografici

- Barbot S., Lapusta N., Avouac J.-P., 2012. Under the Hood of the Earthquake Machine: Toward Predictive Modeling of the Seismic Cycle, *Science*, 336, 707-710.
- Telesca L., 2010. A non-extensive approach in investigating the seismicity of L'Aquila area (central Italy), struck by the April 6th 2009 earthquake (ML5.8), *Terra Nova*, 22, 87-93.
- Uyeda S., Kamogawa M., Tanaka H., 2009. Analysis of electrical activity and seismicity in the natural time domain for the volcanic-seismic swarm activity in 2000 in the Izu Island region, Japan, *J. Geophys. Res.*, 114, B02310.
- Telesca L., Lovallo M., 2009. Non-uniform scaling features in central Italy seismicity: a non-linear approach in investigating seismic patterns and detection of possible earthquake precursors, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01308.
- Cicerone R., Ebel, J.E., J. Britton, 2009. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics* 476, 3–4, 25 371–39.
- Heinicke J., Italiano F., Koch U., Martinelli G., Telesca L., 2010. Anomalous fluid emission of a deep borehole in a seismically active area of Northern, Apennines (Italy). *Applied Geochemistry* 25, 555–571

- Telesca L., Lovallo M., Carniel R., 2010. Time-dependent Fisher Information Measure of volcanic tremor before the 5 April 2003 paroxysm at Stromboli volcano, Italy, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 195, 78–82
- Telesca L., 2012. Maximum Likelihood Estimation of the Nonextensive Parameters of the Earthquake Cumulative Magnitude Distribution, *Bulletin of the Seismological Society of America* 102, 886–891
- Telesca L., Lovallo M., 2012. Analysis of seismic sequences by using the method of visibility graph, *Europhysics Letters* 97, 50002

Linea di Ricerca S3.4. Produzione e sviluppo di modelli di previsione probabilistica dei terremoti con l'integrazione di informazioni relative a precursori sismici staticamente significativi.

(Nota: questa parte della proposta condivide a pieno e riprende il documento S3 già elaborato dal CdP).

a.1. motivazioni/scopi

a.1.1. Produzione di un modello di previsione probabilistica dei terremoti di breve termine.

Lo scopo principale di questa parte del progetto è quello di rendere disponibile al DPC uno strumento di previsione probabilistica che fornisca in tempo reale l'evoluzione temporale della probabilità di accadimento dei terremoti in un arco temporale di giorni/settimane. Lo strumento si baserà sull'integrazione e validazione dei modelli a disposizione attualmente. Tale strumento si potrà utilizzare in due ambiti distinti: a) per monitorare l'evoluzione temporale di una sequenza di aftershocks; b) per stimare la variazione di probabilità di un evento ad alta magnitudo durante una sequenza di potenziali foreshocks. Oltre alla previsione in tempo reale, il modello deve fornire anche una continua verifica sperimentale dei modelli utilizzati (confronto tra previsioni e dati reali come fatto negli esperimenti effettuati nell'ambito del *Collaboratory for the Studies of Earthquake Predictability*, CSEP; vedi S3.c); in presenza di più modelli, il codice deve fornire anche un modello di "sintesi" (*ensemble model*) in cui tutti i modelli sono mediati tenendo conto dei risultati dei test di validazione.

a.1.2. Sviluppo di modelli di previsione dei terremoti di nuova generazione. I modelli di previsione probabilistica disponibili attualmente si basano solo sul concetto di *cluster* spazio-temporale dei terremoti. Ogni altro tipo di informazione è finora trascurato. Nonostante i modelli a *cluster* forniscano stime accurate, è ragionevole pensare che esistano ampi margini di miglioramento in termini di precisione di tali stime. Con questa linea di ricerca si intendono esplorare diversi approcci per includere informazioni di diverso tipo i) fisica dei processi di nucleazione, clusterizzazione e interazione tra faglie; ii) informazioni geologiche che permettano di migliorare significativamente la distribuzione spaziale dei terremoti attesi; iii) modelli di previsione probabilistica che possano includere informazioni provenienti da eventuali precursori "forti" e "deboli", come le anomalie delle onde sismiche e l'emissione di gas dal sottosuolo, variazioni di resistività. In generale, si dovrebbe tenere conto di tutti gli osservabili acquisiti nell'ambito del progetto a patto che si spieghi chiaramente cosa si fa in più e di diverso rispetto ai tentativi fatti finora con scarsi successi (vedi sezione II.B Jordan et al 2011).

a.2. conoscenze pregresse

a.2.1. Allo stato attuale delle conoscenze gli unici modelli utilizzati per l'*Operational Earthquake Forecasting* sono basati sulle proprietà di clusterizzazione spazio-temporale dei terremoti (Jordan et al., 2011). Questi modelli sono ampiamente utilizzati per prevedere l'evoluzione temporale di sequenze di aftershock (Reasenberg and Jones, 1991; Marzocchi and Lombardi, 2009), ma di recente si è notato che forniscono probabilità realistiche anche per sequenze sismiche che possono anticipare un terremoto di grande magnitudo (Marzocchi and Zhuang, 2011). In questi casi, tali modelli forniscono aumenti di probabilità fino a 100-1000 volte rispetto al *background*, ma i valori assoluti di tali probabilità rimangono minori di 1%. Modelli basati sul *cluster* sismico sono gli unici utilizzati finora a livello pratico in California dal *California Earthquake Prediction Evaluation Commettee* (CEPEC); attualmente il progetto UCERF (*Uniform California Earthquake Rupture Forecast*) sta sviluppando un nuovo modello sempre basato sul *clustering* spazio-temporale. Alcuni modelli di questo tipo sono già disponibili per il territorio italiano (utilizzati per la previsione degli *aftershock* dopo il terremoto di L'Aquila). Un loro utilizzo pratico richiede comunque ulteriori passi: a) installazione dei codici in una macchina dedicata e automatizzazione della produzione dei forecast; b) test CSEP retrospettivi e prospettivi per valutare le performances dei modelli e attribuire un peso ad ognuno di loro; c) creazione di un modello *ensemble* che rappresenti una sintesi di tutti i modelli e riporti l'incertezza tra modelli

a.2.2. Tutti gli studi compiuti finora dagli anni settanta non hanno permesso di identificare nessun precursore certo per i grandi terremoti (Jordan et al., 2011). Questo ha portato ad uno scoraggiamento globale in questo campo di ricerca. Ciò nonostante, come riportato nella Recommendation C del report della Commissione Internazionale sulla previsione dei terremoti (Jordan et al., 2011) " *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*". la ricerca su questi temi è ancora molto attiva (vedi WP2 del progetto europeo REAKT).

a.3. metodologie/prodotti attesi

a.3.1. Beneficiando di una attiva collaborazione con i progetti europei in corso per sviluppare in S3 codici finalizzati all'utilizzo pratico di tali modelli nel territorio italiano si potrebbero utilizzare i codici a disposizione in una macchina dedicata per automatizzare la produzione di previsione ogni tre ore.

a.3.2. Creazione di un idoneo database osservazionale contenente tutte le variazioni spazio-temporali (transienti) di segnali misurati (dati geofisici, geochimici e sismici, ecc.) associati ad un incremento della probabilità di accadimento dei terremoti e produzione di modelli di previsione che tengano conto anche dei principali parametri sismotettonici delle strutture sismogeniche.

a.3.3. Verifica prospettiva e retrospettiva delle capacità predittive di ogni modello utilizzando i test che si utilizzano negli esperimenti CSEP; i risultati di questi esperimenti sono fondamentali per attribuire un peso ad ogni modello.

a.3.4. Creazione di un modello unico ensemble tramite la media pesata di tutti i modelli. Le differenze tra le previsioni dei diversi modelli forniranno anche una valutazione delle incertezze associate.

a.3.5. Le ricerche sui precursori sono ricerche a bassa probabilità di successo ma con un possibile alto impatto. Non si possono garantire prodotti utilizzabili, ma solo un chiaro e focalizzato impegno in questa direzione. Lo scopo ultimo è quello di utilizzare tutti i risultati ottenuti per migliorare i modelli prodotti in S3.a, quindi ogni modello fornito deve essere verificabile secondo le procedure CSEP.

a.4. applicabilità-fruibilità immediata

Il modello fornito può essere utilizzato immediatamente dalla DPC poiché rappresenta una immagine del grado di conoscenza attuale sulla previsione probabilistica di breve termine. Vista la delicatezza dell'argomento è necessario un previo accordo tra tutti i partecipanti all'iniziativa sull'utilizzo e sulla comunicazione dei risultati.

I prodotti che possono scaturire nel primo anno della ricerca sono lo sviluppo e l'applicazione di tecniche statistiche e modelli a sequenze sismiche e a serie storiche di segnali geofisici misurati in aree sismiche e la redazione di rapporti e/o documenti per valutare una eventuale applicabilità di tali tecniche in ambito operativo.

a.5. riferimenti bibliografici

- Barbot S., Lapusta N., Avouac J.-P., 2012. Under the Hood of the Earthquake Machine: Toward Predictive Modeling of the Seismic Cycle, *Science*, 336, 707-710.
- Buscema M., Benzi R., 2012, Quakes Prediction Using Highly Non Linear Systems and A Minimal Dataset.
- Catalli, F.; M. Cocco, R. Console, et al., Modeling seismicity rate changes during the 1997 Umbria-Marche sequence (central Italy) through a rate- and state-dependent model, *J. Geophys. Res.*, 113, doi: 10.1029/2007JB005356, 2008.
- Cinti, F. R.; L. Faenza; W. Marzocchi et al., Probability map of the next $M \geq 5.5$ earthquakes in Italy, *Gechemistry Geophysics Geosystems*, 5, doi:10.1029/2004GC000724, 2004.
- Console, R., M. Murru, and F. Catalli, Physical and stochastic models of earthquake clustering, *Tectonophysics*, 417, 141-153, 2006.
- Console, R., M. Murru, F. Catalli, and G. Falcone, Real time forecasts through an earthquake clustering model constrained by the rate-and-state constitutive law: Comparison with a purely stochastic ETAS model, *Seismological Research Letters*, 78, 49-56, 2007.
- Console, R., M. Murru, G. Falcone, Probability gains of an epidemic-type aftershock sequence model in retrospective forecasting of $M > 5.0$ earthquakes in Italy, *J. of Seismology*, 14, 9-26, doi:10.1007/s10950-009-9161-3, 2010.
- Console, R.; D. D. Jackson, Y. Y. Kagan, Using the ETAS Model for Catalog Declustering and Seismic Background Assessment, *Pure and Applied Geophysics (Pageoph)*, 167, 819-830, doi:10.1007/s00024-010-0065-5, 2010.
- Faenza, L.; W. Marzocchi, The Proportional Hazard Model as applied to the CSEP forecasting area in Italy, *Annals of Geophysics*, 53, 77-84, doi: 10.4401/ag-4759, 2010.
- Faenza, L; W. Marzocchi; E. Boschi, A non-parametric hazard model to characterize the spatio-temporal occurrence of large earthquakes; an application to the Italian catalogue Source:, *Geophys. J. Intern.*, Volume 155, Issue: 2, Pages 521-531, doi: 10.1046/j.1365-246X.2003.02068.x, 2003.
- Falcone G., R. Console and M. Murru, Short-term and long-term earthquake occurrence models for Italy: ETAS, ERS and LTST, *Annals of Geophysics*, 53, 3, 41-50, doi: 10.4401/ag-4760, Special volume entitled "An earthquake forecast experiment in Italy", 2010.
- Jordan, T. H. (2006). Earthquake predictability, brick by brick, *Seismol. Res. Lett.*, 77, 3-6.
- 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
- Marzocchi W., A.M. Lombardi, 2009. Real-time forecasting following a damaging earthquake. Geophys. Res. Lett., 36, L21302, doi:10.1029/2009GL040233.
 - Marzocchi W., J. Zhuang, 2011. Statistics between mainshocks and foreshocks in Italy and Southern California. Geophys. Res. Lett., 38, L09310, doi:10.1029/2011GL047165
 - Marzocchi, W., J. Selva, F. R. Cinti, P. Montone, S. Pierdominici, R. Schivardi, and E. Boschi (2009). On the occurrence of large earthquakes: New insights from a model based on interacting faults embedded in a realistic tectonic setting, J. Geophys. Res., 114, B01307, doi: 10.1029/2008jb005822.
 - Murru M., R. Console, G. Falcone, Real-time earthquake forecasting in Italy, Tectonophysics, 470, 214-223, doi:10.1016/j.tecto.2008.09.010, 2009.
 - Murru, M., R. Console; A. Lisi, Seismicity and mean magnitude variations correlated to the strongest earthquakes of the 1997 Umbria-Marche sequence (central Italy), J. Geophys. Res., 109, doi:10.1029/2002JB002276, 2004.

Organizzazione delle Unità Operative

La scelta delle Unità Operative sarà basata su una attenta valutazione delle competenze scientifiche necessarie per lo svolgimento delle attività di progetto, garantendo da una forte multidisciplinarietà e dall'altro una buona sinergia tra i vari gruppi di lavoro. In sintesi la scelta e sarà effettuata sulla base delle seguenti caratteristiche:

- eccellenza scientifica nei settori di riferimento del progetto;
- adeguata dotazione di risorse di personale e strumentali per lo svolgimento delle attività di ricerca;
- forte coinvolgimento dei componenti delle Unità Operative in programmi europei (FP7) ed internazionali;
- esperienza pregressa in progetti di interesse per il DPC.