

## **Progetto S3: proposta per un programma di ricerca relativo alle previsioni a breve termine dei terremoti**

*Dario Albarello*

*Dip. di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena*

*Via Laterina, 8, 53100 Siena*

### ***Basi concettuali, Motivazioni e Scopi***

Nell'ambito delle linee di indirizzo decennali per i progetti previsti dall'accordo quadro DPC-INGV per il decennio 2012-2021, il progetto S3 ha come obiettivo lo sviluppo di metodi efficaci per la previsione a breve termine (fino a qualche mese secondo la nomenclatura proposta in Jordan et al., 2011) di terremoti potenzialmente distruttivi. Oltre alla differente scala temporale considerata rispetto al progetto S2, una importante differenza è l'obiettivo della previsione: mentre il "focus" di S2 è uno scenario di scuotimento (in termini di un limite superiore ragionevolmente atteso), quello di S3 è la determinazione dello stato del processo sismogenico all'interno di un volume crostale potenzialmente capace di generare eventi sismici dannosi. Nonostante queste importanti differenze, trattandosi di tentativi di previsione condotte in condizioni di incertezza (sia essa di carattere epistemico o aleatorio secondo una distinzione da alcuni ritenuta importante), l'esito delle indagini promosse in S3 dovranno comunque avere una forma "probabilistica" che caratterizzi il livello di verosimiglianza associato alle stime fornite. In questo contesto, i vari approcci alla "previsione" degli scenari di scuotimento futuri si differenziano essenzialmente per il diverso ruolo attribuito alla componente deterministica delle stime (ovvero quella base informativa legata alla modellazione fisica e geologica del processo indagato) in rapporto alla componente statistico/probabilistica (ovvero legata alla modellazione stocastica dello stesso processo). In questo senso, entrambe i progetti S2 ed S3 devono svilupparsi lungo un percorso che fa tesoro dei risultati raggiunti nell'ambito del progetto S1 che è più strettamente orientato allo sviluppo delle conoscenze relative al processo sismogenico.

Una differenza importante rispetto agli altri due progetti sismologici previsti (S1 ed S2), il progetto S3 sconta una fondamentale mancanza di ricerche coordinate (e opportunamente finanziate) a scala nazionale e dedicate all'argomento. D'altro canto, come sottolineato dalla Commissione Internazionale sulla Previsione dei Terremoti per la Protezione Civile (Jordan et al., 2011), ricerche in questo senso devono far parte di un programma nazionale che abbia come fine ultimo per lo sviluppo di strumenti di previsione utili per la riduzione del rischio sismico. In questo senso, la disponibilità di strumenti di previsione a breve termine costituisce una fondamentale integrazione ad analoghi strumenti relativi alla previsione a medio e lungo termine. In particolare, potrebbe essere di grande utilità per la definizione di aree di intervento prioritarie per interventi mirati alla riduzione del rischio di strutture strategiche e per una migliore gestione delle emergenze. Da questo punto di vista, lo sviluppo di strumenti di previsione molto dettagliati (in termini di finestra spazio-temporale dell'evento atteso) potrebbe essere meno importante riguardo alla possibile disponibilità di uno strumento meno preciso ma efficace per la selezione di aree potenzialmente più "a rischio" nel breve termine.

In questa sede è utile distinguere varie classi di fenomeni e oggetto di osservazioni e ricerche negli ultimi anni (si veda Cicerone et al., 2009 per una revisione generale della letteratura sull'argomento). La prima classe, oggetto di maggiore interesse negli ultimi anni (Jordan et al., 2011) è quella legata alla osservazione della sismicità stessa utilizzando modelli stocastici di vario genere. La seconda classe riguarda il monitoraggio dei fluidi nel sottosuolo (Radon, piezometrie, conducibilità elettrica, ecc.) e dei parametri fisici e meccanici del

terreno (anomalie termiche, campo di deformazione da dati locali e a larga scala, rapporto  $V_p/V_s$ , ecc.) mediante misure di superficie. La terza classe riguarda procedure di controllo remoto a larga scala (variazioni del campo elettromagnetico, analisi di immagini da satellite). Si tratta di osservabili di tipo assai differente che rappresentano comunque aspetti diversi e complementari del processo sismogenico. I dati ad oggi disponibili sembrano conferire maggiore attendibilità ad alcuni osservabili della prima delle classi qui elencate (Jordan et al., 2011). In generale manca ad oggi un modello condiviso e ben fondato sperimentalmente capace di stabilire una relazione diretta fra il processo sismogenico e l'insieme degli osservabili finora proposti come rappresentativi del processo di preparazione al terremoto (Mulargia e Geller, 2003). Dati recenti (Amoruso e Crescentini, 2012) sembrano indicare che il processo di nucleazione del terremoto debba essere molto locale (meno di  $100 \text{ km}^3$  attorno al potenziale ipocentro) e questo sembra rendere assai problematico, se non in casi particolari, il possibile monitoraggio del fenomeno con osservazioni di superficie. Questo spiega le difficoltà finora incontrate nell'associare mediante una semplice relazione uno-a-uno di "anomalie" relative ad un qualche osservabile e la successiva generazione del terremoto (Jordan et al., 2011).

D'altro canto è stato da più parti suggerito (p.es., Kagan, 1994; Main, 1995, 1996) che il processo sismogenico abbia un carattere di "criticalità" (e.g. Kagan, 1992; Turcotte, 1992) effetto dell'interazione meccanica a scala locale di una molteplicità di strutture sismogeniche elementari (p.es., Sacks and Rydelek, 1995; Castellaro and Mulargia, 2001). Questo tipo di sistema è caratterizzato da una forte sensibilità a variazioni anche piccole dell'ambiente tettonico. In particolare, piccole variazioni nel campo di deformazione (dell'ordine di  $0.1 \mu\text{strain}$ ), possono modificare in maniera significativa il livello di pericolosità sismica (p.es., Rydelek and Sacks, 1999). In quest'ottica il problema della individuazione di osservabili capaci di fornire indicazioni di breve termine sull'occorrenza di futuri eventi sismici sembra richiedere un cambio di paradigma (Albarelo, 2005) che veda in questi ultimi più che un semplice strumento diretto di predizione, indicatori di un processo complessivo di variazione a breve termine del campo di deformazione di cui lo stesso evento sismico è sintomo. In questo senso, non sarebbe il processo di nucleazione del terremoto a generare "anomalie" di qualche tipo, ma piuttosto essere il terremoto uno degli effetti di un processo più ampio (sia in termini spaziali che temporali) associato ad un cambiamento di breve medio termine dello stato di deformazione crostale (Raydelek e Sacks, 1990, Pollitz et al., 2006; Rayder et al., 2007; Viti et al., 2003; Mantovani et al., 2010; Mantovani et al., 2012), cambiamento potenzialmente testimoniato congiuntamente da osservabili di tipo differente. Questo paradigma sposta l'attenzione dalla singola "anomalia" dell'osservabile considerato, alla ricostruzione di un processo complessivo a scala regionale all'interno del quale la sismogenesi si iscrive. Se si abbandona quindi una ricerca caratterizzata da una visione riduttiva del problema, ovvero tutta finalizzata alla ricerca della semplice coppia "precursore-evento", è forse possibile ritrovare una visione più organica del problema capace di superare le difficoltà e i conflitti che hanno dominato il recente panorama del dibattito sismologico.

Se si adotta questo diverso paradigma, risulta evidente che il limite principale nelle ricerche volte alla individuazione di osservabili informativi sullo stato del processo sismogenico sta nella mancata disponibilità di dati osservativi caratterizzati da adeguata estensione temporale e spaziale (Albarelo e Meletti, 2012). Nel corso degli anni è infatti mancato uno sforzo coordinato e adeguatamente finanziato per il monitoraggio dei gli osservabili di potenziale interesse. Risulta quindi essenziale superare questo grave handicap, cercando di mettere in campo politiche virtuose capaci nel prossimo futuro di fornire indicazioni utili alla individuazione a breve termine delle zone esposte a eventi sismici potenzialmente dannosi.

Nella scelta degli osservabili potenzialmente utili, l'approccio proposto ha quattro elementi di base:

1. La preferenza per osservazioni multiparametriche di “area vasta” capaci di fornire una immagine complessiva dei processi in atto
2. La sostenibilità economica delle procedure di monitoraggio eventualmente considerate (bassi costi di esercizio) tale da garantire l’applicabilità delle procedure di osservazione anche su periodi lunghi (ovvero molto maggiori della durata del progetto)
3. La disponibilità di modelli fisici capaci di stabilire una relazione plausibile fra l’osservabile il processo sismogenico
4. La falsificabilità delle ipotesi relative al possibile legame fra gli osservabili di volta in volta considerati e lo stato del processo sismo genico.

Il programma di ricerca qui proposto si muove nell’ambito di questa “visione” del problema con il vincolo essenziale posto dalla durata relativamente ridotta del progetto che, anche se potenzialmente estendibile ad altri due anni, è per ora limitato al solo primo anno: è all’interno di questo breve intervallo di tempo che è necessario produrre risultati che mostrino il possibile valore applicativo delle ricerche svolte.

Negli ultimi anni, anche se in modo non sempre ottimale, in mancanza di azioni di coordinamento e senza adeguati finanziamenti, sono proseguite indagini e ricerche condotte in varie aree del Paese e basate sull’osservazione di parametri assai diversi fra loro. Un elemento chiave del progetto proposto, almeno nella sua fase iniziale, sarà quindi lo sfruttamento intensivo di dati già raccolti nel recente passato e caratterizzati da standard scientifici adeguati. Questi dati potranno fornire una adeguata base di partenza per una disamina del potenziale informativo fornito da questo tipo di osservazioni e la identificazione di procedure di monitoraggio ottimali, lasciando ad una seconda fase (secondo e terzo anno) lo sviluppo di protocolli operativi per la previsione a breve termine dei futuri eventi sismici.

Vale la pena qui di elencare alcune ricerche condotte negli ultimi anni mediante sistemi di acquisizione su reti di monitoraggio (area vasta) e caratterizzate da buona continuità temporale. Sarà questo il bacino cui attingere per un primo approccio al problema.

#### *1. Osservazioni di carattere idrologico e geochimico*

Ogni Regione e Provincia Autonoma è dotata di una rete per il monitoraggio con tecniche manuali del livello dell’acqua e della sua composizione chimica in pozzi, piezometri e sorgenti (in questo caso si misura la portata anziché il livello). La densità è di circa un punto di osservazione ogni 35-50 km<sup>2</sup>. Le misurazioni avvengono di norma due volte l’anno ma alcuni sottoinsiemi delle reti possono essere monitorati con maggiore frequenza, fino a una volta al mese. Esistono inoltre ulteriori reti di monitoraggio in grado di misurare automaticamente e con frequenza ad es. oraria il livello e a volte la conducibilità elettrica delle acque di pozzi o sorgenti (portata) e trasmettere dati ad un centro di acquisizione normalmente situato nel Capoluogo Regionale o della Provincia Autonoma. La densità è di circa un punto di osservazione ogni 500-700 km<sup>2</sup> nelle Regioni settentrionali in cui densità maggiori sono rilevabili nelle regioni dell’arco Alpino. Nelle Regioni meridionali queste metodologie sono scarsamente adottate ad eccezione della Sicilia dove è stata messa a punto una rete dedicata a cura dell’INGV di Palermo. In linea di principio le reti descritte possono essere utilizzate per attività di ricerca sui fenomeni sismogenici anche se le strutture ARPA eseguono le attività di monitoraggio per finalità esclusivamente ambientali. Inoltre molti punti di osservazione sono ubicati in luoghi affetti da forti disturbi di origine antropica che limitano la loro utilità per le ricerche sui precursori sismici. Una

stima recente indica che circa il 30% dei punti monitorati è comunque utilizzabile. Le reti descritte non dispongono di operatori preposti allo studio dei precursori sismici e operano come sistemi di acquisizione di dati che annualmente vengono trasferiti ad ISPRA e alla UE. Esempi di utilizzo delle reti per finalità di studio su argomenti connessi con la sismicità sono stati effettuati da Albarello e Martinelli (1994) in Emilia-Romagna.

Esistono anche esperienze locali di reti temporanee (ARPA Umbria, ARPA Piemonte) o permanenti (Regione Toscana) messe a punto per lo studio di possibili fenomeni idrologici precursori dei terremoti. La rete dell'Umbria era composta da sensori automatici ubicati in oltre 20 sorgenti della Regione Umbria. E' stata messa a punto in collaborazione con INGV e CNR-IGG dopo il terremoto del 1997. Non ha dato risultati soddisfacenti ed è stata dismessa. Una analoga rete è stata messa a punto in Piemonte a seguito del terremoto di Asti. Una rete composta da 3 sensori per livello, temperatura e conducibilità elettrica ha funzionato in provincia di Asti, gestita da personale di ARPA Piemonte con la collaborazione di INGV (rif. Dr.ssa Fedora Quattrocchi). Non è noto se è ancora operativa. Singoli strumenti sono stati posizionati da CNR-IMAA in collaborazione con Saxon Akademie Wissenschaften (Rif. Dr. Jens Heinicke, ora University of Leipzig) e con ARPA Emilia-Romagna (Dr. Giovanni Martinelli) in sorgenti ubicate in Basilicata, Umbria, Emilia-Romagna i cui dati sono stati oggetto di pubblicazioni scientifiche. Esiste inoltre una rete gestita dalla Regione Toscana in collaborazione con il CNR-IGG (Rif. Dr.ssa Lisa Pierotti). Si tratta di 5 sensori per componenti gassosi, pH e temperatura disciolti in acque di sorgenti selezionate i cui valori sono monitorati e teletrasmessi insieme ai valori di deformazione crostale rilevati costantemente da sensori GPS. La rete è operativa e i dati rilevati sono stati oggetto di pubblicazioni scientifiche. Nell'area Friulana sono da anni in corso forme di monitoraggio continuo e non, su sorgenti d'acqua localizzate lungo importanti strutture tettoniche relativamente a : concentrazione di radon, temperatura, pH, conducibilità, EH (Petrini et al., 2012).

## *2. Osservazioni relative alle variazioni del campo elettromagnetico*

Esiste una rete di monitoraggio per lo studio dei fenomeni di carattere elettromagnetico su LF e VLF gestito dall'Università di Bari (Rif. Prof. Pier Francesco Biagi). 7 sensori risultano operativi sul territorio nazionale e altri 4 in Europa. I sistemi di acquisizione teletrasmettono i dati rilevati al centro di acquisizione a Bari (Rif. NHESS). I dati sono costantemente oggetto di pubblicazioni scientifiche (si veda in proposito il recente numero monografico di Annals of Geophysics (Vol 55, del 2012).

Esiste inoltre una attività di monitoraggio e ricerca sulle VLF promossa dall'ARI (Associazione Radioamatori Italiani) nel 2009 (Rif. Dr. Riccardo Rossi). Hanno aderito circa 12 sezioni ARI e i risultati sono stati oggetto di comunicazioni in convegni radioamatoriali o diffusi tramite web. Altre 7 stazioni di monitoraggio dedicate alla acquisizione, teletrasmissione e studio dei fenomeni precursori sono attualmente gestite dal Dr. Cristiano Fidani in collaborazione con i soggetti affidatari degli strumenti tra cui l'Università di Siena. Esistono inoltre singole strumentazioni o reti temporanee sullo stesso argomento gestite dall'INGV (Rif. Dr. Antonio Meloni) e dall'Università dell'Aquila (Rif. Prof. Umberto Villante).

## *3. Osservazioni relative a processi di deformazione crostale a breve termine*

Esiste una rete di carattere GPS costituita da 38 stazioni in teletrasmissione gestita dall'INGV e utilizzabile, in principio, per lo studio dei fenomeni precursori (Rif. Dr. G.Selvaggi ). Esiste una rete di carattere GPS gestita dalla Regione Toscana congiuntamente con l'Università di Siena (Rif. Prof. Enzo Mantovani, vedi anche precursori di carattere sismologico). Una parte dei sensori è affiancata da stazioni di carattere geochimico per il monitoraggio dei gas disciolti in sorgenti selezionate in collaborazione con CNR-IGG (Dr.ssa Lisa Pierotti). Esiste una rete composta da sensori di tipo GPS, inclinometri e tiltmetri gestita da INOGS in collaborazione con l'Università di Trieste (Rif. Dr.ssa Carla Braitenberg) i cui dati sono costantemente oggetto di pubblicazione. Attività di monitoraggio per l'osservazione di fenomeni di deformazione crostale utilizzabile, in principio, per lo studio di fenomeni associati alla sismicità è compiuta tramite tecniche interferometriche da satellite adottate dall'INGV (Rif. Dr. S.Salvi) e dal CNR-IREA (Rif. Dr. R. Lanari). Infine sono disponibili misure di deformazione di altissima precisione ottenute dallo strain-meter posto all'interno dell'Osservatorio del Gran Sasso (p.es., Amoroso e Crescentini, 2012)

#### 4. Osservazioni da satellite

Queste sono basate sull'impiego di 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, ceneri, 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 (Pergola et al., 2002). Queste tecnologie possono essere adeguatamente sperimentate anche nel monitoraggio di strutture sismogeniche anche se la maggior complessità ed estrema variabilità della dinamica spazio-temporale dei fenomeni sismici rende 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 (Corrado et al., 2002; Tramutoli et al., 2005; Genzano et al., 2007).

#### 5. Osservazioni sismometriche

Lo studio della sequenza di *foreshock* del terremoto dell'Aquila ha dimostrato che le proprietà fisiche delle rocce circostanti il punto di nucleazione della scossa maggiore hanno subito importanti cambiamenti durante la fase preparatoria del terremoto, in conseguenza dell'evoluzione dello stato di sforzo nella zona di faglia. La variazione delle proprietà elastiche del mezzo ha influito sulle modalità di propagazione delle onde sismiche, generando variazioni misurabili di quantità sismologiche come il  $V_p/V_s$  e i parametri di *splitting* delle onde S probabilmente legati a processi deformativi associati a diffusione di fluidi (Chiarabba et al., 2009; Lucente et al., 2010). In quest'ambito, il monitoraggio e la stima di parametri quali il rapporto di velocità delle onde P ed S ( $V_p/V_s$ ) e l'anisotropia sismica a partire da registrazioni di terremoti crostali ben localizzati possono contribuire in maniera fondamentale alla comprensione dei processi che geodinamici in corso all'interno di volumi crostali estesi.

Recentemente un'approfondita analisi della dinamica spazio-temporale della sismicità è stata condotta usando diverse e innovative metodologie statistiche, che hanno rivelato la proprietà di *time-clustering* e di correlazione temporale tra gli eventi (Telesca e Lovallo, 2009) informative di fenomeni critici precedenti l'occorrenza di eventi estremi (Telesca, 2010). Inoltre lo sviluppo e l'applicazione di tecniche statistiche robuste ha consentito l'identificazione di anomalie geofisiche pre- e co-sismiche (Heinicke et

al., 2010). Analoghe analisi condotte a partire da modelli fenomenologici differenti sono stati condotti anche da altri autori (p.es. Gentili, 2010) e sono alla base di modelli ampiamente utilizzati per prevedere l'evoluzione temporale di sequenze di aftershock (Marzocchi and Lombardi, 2009). Di recente si è anche avanzata l'ipotesi che questo tipo di osservabili può fornire stime della probabilità di accadimento realistiche anche per sequenze sismiche che possono anticipare un terremoto di grande magnitudo (Marzocchi and Zhuang, 2011).

### **Articolazione del progetto**

Viene proposta l'articolazione delle ricerche in due sottoprogetti, ciascuno di durata annuale e associati a due obiettivi principali

**Sottoprogetto a:** ha come scopo la costruzione di una banca dati organica e delle osservazioni fornite nel corso degli anni dalle diverse reti di monitoraggio distribuite sul territorio, con particolare attenzione alla pianura Padana e all'Appennino Meridionale.

Questo sottoprogetto si articola in 6 Task, ognuno dedicato ad uno specifico tipo di osservabile. Ogni task è affidato ad una UR il cui coordinatore si incaricherà di coordinare vari gruppi di lavoro (anche afferenti a diverse amministrazioni) e di veicolare in una sede unitaria il flusso informativo proveniente dai diversi gruppi che hanno gestito o gestiscono reti di monitoraggio per gli osservabili di sua competenza. Per ciascun osservabile dovranno essere individuati standard sperimentali adeguati che dovranno essere applicati alle diverse reti in funzione. I coordinatori delle varie UR si occuperanno anche di completare le informazioni raccolte con dati accessori (p.es., parametri climatici, ecc.) relativi alle stazioni di monitoraggio. A carico di queste UR è anche il tentativo di attribuire valori di verosimiglianza quantitativi (probabilità) relativamente all'associazione fra i diversi osservabili e il processo sismogenico.

Viene proposta la seguente articolazione:

*Task 1: Dati idrologici e geochimici*

*Task 2: Dati elettromagnetici*

*Task 3: Dati da satellite*

*Task 4: Dati Geodetici*

*Task 5: Dati sismici*

**Sottoprogetto b:** ha come oggetto la ottimizzazione delle procedure di monitoraggio a partire dalla selezione degli osservabili più affidabili attraverso un processo di validazione, definirne il ruolo nell'ambito di stime di pericolosità e identificando le zone di maggiore interesse per la valutazione del potenziale informativo disponibile. Vengono individuati due Task

*Task 1: Validazione e formalizzazione*

Nello studio dei fenomeni qui considerati, una selezione rigorosa di osservabili potenzialmente efficaci deve costituire un elemento chiave. Esistono due diverse modalità di selezione. La prima è basata sulla valutazione della qualità e della coerenza dei modelli fisici proposti per giustificare l'associazione fra l'osservabile ed il processo sismo genico. La seconda è una accurata valutazione di tipo empirico, condotta

utilizzando rigorosi e coerenti metodi di valutazione statistico/probabilistica (Mulargia e Geller, 2003; Jordan et al., 2011). Questo doppio percorso valutativo è l'unico modo di evitare le pericolose e futili "guerre di religione" che hanno infestato questo argomento di ricerca. Un compito importante di questo task è anche quello di armonizzare il possibile ruolo informativo associato ai diversi osservabili all'interno di una formulazione probabilistica della possibile associazione fra gli osservabili giudicati informativi e il processo sismogenico. Questa formulazione è il compito essenziale di permettere l'integrazione degli esiti del progetto con quelli di S2 relativi alle stime di pericolosità.

#### *Task 2: Definizione delle aree di maggiore interesse*

Le difficoltà anche economiche connesse al mantenimento di reti di osservazione estese sono tali da giustificare il carattere sparso ed episodico di molti studi volti al monitoraggio del processo sismogenico tramite osservazioni indirette. Per questo motivo sembra indispensabile fornire indicazioni preliminari su quali aree siano le più interessanti dal punto di vista di questi studi ovvero tali da lasciare prevedere nel medio termine la possibile presenza di eventi sismici intensi e laddove sia immaginabile la presenza di osservabili potenzialmente connessi a processi profondi. Un primo tentativo di identificare questo tipo di situazioni fu proposto da Martinelli e Albarello (1997) considerando indicazioni di tipo sismologico e geochimico.

Si tratta effettivamente di mettere a frutto parte dei risultati prodotti nell'ambito del progetto S2 riguardo a modelli dipendenti dal tempo, relativamente alla parte relativa alla generazione dei terremoti. Inoltre verranno prese in particolare considerazione modellazioni delle variazioni a scala regionale dello stato di carico della litosfera nelle aree della Pianura Padana e dell'Appennino Meridionale, dedotte mediante metodi geologici e modellazione geodinamica (p.es. Viti et al., 2003; Mantovani et al. 2010) o metodi fenomenologico/statistici (Panza et al., 2011; Peresan et al., 2005). Le carte prodotte mediante questi approcci verranno valutate dall'insieme dei partecipanti al progetto e saranno utilizzate come base per la pianificazione delle attività di ricerca nei successivi anni del progetto.

### **Risultati attesi nel primo anno in rapporto alle linee guida e possibilità di utilizzo da parte del DPC**

Il principale risultato atteso è la costruzione di una banca dati documentata e accessibile delle misure di area vasta condotte sul territorio nazionale riguardo ai diversi osservabili potenzialmente informativi sulle variazioni a breve termine dello stato di deformazione crostale e sul processo sismo genico

Un secondo risultato atteso è la definizione di standard sperimentali per i diversi osservabili in rapporto alla densità spazio-temporale delle misure, alle modalità di raccolta e integrazione

Un terzo risultato è una analisi critica delle potenzialità informative di ciascun osservabile considerato (da solo ed in associazione agli altri) a partire da un esame delle basi fisiche relative ai rispettivi modelli interpretativi e soprattutto al confronto retrospettivo con eventi sismici effettivamente avvenuti

Un quarto risultato è l'Individuazione (all'interno delle zone di maggiore interesse per il DPC ovvero la Pianura Padana e l'Appennino Meridionale) delle aree più interessanti per lo studio di fenomeni associati alla sismo genesi e nelle quali sarà maggiormente utile dislocare gli apparati di misura

Questi risultati saranno utilizzati come guida per gli sviluppi successivi del progetto

### **Risultati attesi negli anni successivi**

Gli sviluppi previsti per gli anni successivi al primo riguardano essenzialmente

1. la definizione e il dispiegamento nelle aree di maggiore interesse di reti di sensori per il monitoraggio degli osservabili ritenuti più efficaci
2. lo sviluppo di modelli operativi per la individuazione di volumi crostali potenzialmente interessati da eventi sismici significativi sulla base delle osservazioni disponibili: questi modelli dovranno essere capaci di fornire previsioni in forma probabilistica, ovvero dovranno includere stime del possibile livello di verosimiglianza associato alle previsioni effettuate.
3. Procedure di integrazione delle stime di pericolosità a breve termine con quelle a medio e lungo termine

## Bibliografia

- Albarelo D., 2005. Mud volcanoes as natural strainmeters: a working hypothesis. In Martinelli G. and Panahi B. (eds), "Mud Volcanoes, geodynamics and seismicity". NATO Science Series IV, v.51, Kluwer, 239-249
- Albarelo D. e Martinelli G., 1994 - Piezometric levels as a possible geodynamic indicator: analysis of the data from a regional deep waters monitoring network in Northern Italy. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1955-1958
- Amoruso A., Crescentini L., 2012. Pre-seismic phenomena from continuous near-field strain measurements: a brief review and the case of the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake. *Boll.Geofis.Teor.Appl.*, Vol. 53, n. 1, pp. 169-190, DOI 10.4430/bgta0039
- Castellaro S. and Mulargia F., 2001. A simple but effective cellular automation for earthquakes. *Geophys.J.Int.*, 144, 609-624
- Chiarabba, C., De Gori, P., and Boschi, E., 2009, Porepressure migration along a normal-fault system resolved by time-repeated seismic tomography: *Geology*, v. 37, p. 67–70, doi: 10.1130/G25220A.1.
- Cicerone R., Ebel, J.E., J. Britton, 2009. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476, 3–4, 25 371–39.
- Corrado R., Caputo R., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C. & Tramutoli V. (2005): Seismically active area monitoring by robust TIR satellite techniques: a sensitivity analysis on low magnitude earthquakes in Greece and Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(1), 101-108
- Gentili, S. (2010), Distribution of Seismicity Before the Larger Earthquakes in Italy in the Time Interval 1994–2004. *Pure Appl. Geophys.* 167 933–958
- 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)
- Kagan, Y.Y., 1994. Observational evidence for earthquakes as a non linear dynamic process. *Physica D*, 77, 160-192
- Lucente F.P., Gori P.D., Margheriti L., Piccinini D., Bona M.D., 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, 1015–1018, doi: 10.1130/G31463.1
- Main i., 1995. Earthquake as critical phenomena: implications for probabilistic seismic hazard analysis. *Bull.Seism.Soc.Am.*, 85, 5, 1299-1308
- Main I., 1996. Statistical physics, seismogenesis and seismic hazard. *Rev.Geophys.*, 34, 4, 433-462
- Mantovani E., Viti M., Babbucci D., Cenni N., Tamburelli C. and Vannucchi A.; 2012: Middle term prediction of earthquakes in Italy: some remarks on empirical and deterministic approaches. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **53**, 89-111, doi: 10.4430/bgta0037

- Mantovani E., Viti M., Babbucci D., Albarello D., Cenni N., Vannucchi A.; 2010: Long-term earthquake triggering in the Southern and Northern Apennines. *J.Seismol.*, 14, 53-65
- Martinelli G. e Albarello D., 1997 - Main constraints for siting of monitoring network devoted to the study of earthquake related hydrogeochemical phenomena in Italy. *Ann.Geofis.*, XL, 6, 1505-1525
- 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
- Mulargia F. and Geller R.J. (eds), "Earthquake science and seismic risk reduction. NATO Science Series IV, v.32, Kluwer, 148-158
- Peresan, A; V. Kossobokov; L. Romashkova; G.F. Panza., Intermediate-term middle-range earthquake predictions in Italy: a review, *Earth Science Reviews*, 69, 97-132, doi:10.1016/j.earscirev.2004.07.005, 2005.
- Pergola N., 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).
- Petrini R., F.Italiano, A.Riggio, F.F. Slejko, M.Santulin, A.Buccianti, P.Bonfanti and D.Slejko. Coupling geochemical and geophysical signatures to constrain strain changes along thrust faults. *Boll.Geof.Teor.Appl.* Vol.53,n.1, pp. 113-134
- Pollitz F.F., Burgmann R. and Banerjee P.; 2006: Post-seismic relaxation following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake on a compressible self-gravitating. *Geophys. J. Int.*, 167, 397-420, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03018.
- Rydelek P.A. and Sacks I.S.; 1990: Asthenospheric viscosity and stress diffusion: a mechanism to explain correlated earthquakes and surface deformation in NE Japan. *Geophys. J. Int.*, **100**, 39-58.
- Rydelek P.A., and I.S. Sacks, 1999. Large earthquake occurrence affected by small stress changes. *Bull.Seism.Soc.Am.*, 89, 822-828
- Ryder I., Parsons B.E., Wright T.J. and Funning G.J.; 2007: Post-seismic motion following the 1997 Manji (Tibet) earthquake: InSAR observations and modelling. *Geophys. J. Int.*, **169**, 1009-1027, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03312.x
- Sacks I.S., Rydelek P.A., 1995. Earthquake "quanta" as an explanation of observed magnitudes and stress drops. *Bull.Seism.Soc.Am.*, 85, 3, 808-813
- 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.
- 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.

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).

Viti M., D'Onza F., Mantovani E., Albarello D. and Cenni N.; 2003: Post-seismic relaxation and earthquake triggering in the southern Adriatic region. *Geophys. J. Int.*, 153, 645-657.