

## Progetto S2

### La Pericolosità Sismica Fault-Based e Time-Dependent nell'Appennino Meridionale

Coordinatore: Aybige Akinci (INGV, Roma)

**BOZZA PRELIMINARE (30.05.2012)**

#### 1. Obiettivo

Lo scopo del sottoprogetto è sviluppare un modello per il calcolo della pericolosità sismica a lungo e medio termine (dipendenza temporale) utilizzando le informazioni sismotettoniche disponibili, in termini di geometrie delle strutture, distribuzione della sismicità storica e strumentale, associazioni terremoto-struttura e tassi di deformazione elaborando diversi modelli di occorrenza dei terremoti per l'Appennino meridionale. Il modello sarà realizzato per un framework, con l'obiettivo di renderlo flessibile per ulteriori aggiornamenti, ove è possibile, in seguito all'ottimizzazione del modello stesso, alla raccolta dei nuovi dati ed al verificarsi di significativi terremoti.

Il modello per il calcolo della pericolosità sismica raccoglie le esperienze maturate nei precedenti progetti, lavori nazionali e internazionali. Partendo dai prodotti delle passate convenzioni INGV-DPC il progetto avrà un compito di omogeneizzare e integrare i risultati ottenuti attraverso i diversi approcci per incorporare le nuove informazioni in un modello nazionale di pericolosità.

Negli ultimi anni sia in Italia che nel mondo, si sta mettendo a punto approcci innovativi da utilizzare per la stima probabilistica della pericolosità sismica, che prendono in considerazione le singole sorgenti sismogenetiche per i forti terremoti utilizzando le relative informazioni sismologiche, geologiche e geodetiche. Inoltre, in queste elaborazioni è possibile utilizzare per le principali sorgenti sismogenetiche modelli di occorrenza diversi, definiti sia nello spazio (terremoto caratteristico o distribuzione Gutenberg-Richter, attivazione di sorgenti adiacenti, propagazione della rottura lungo la faglia, ecc.), sia nel tempo (distribuzione poissoniana, oppure modelli basati sul tempo trascorso dall'ultimo evento; in sismologia questi ultimi modelli sono impropriamente chiamati processi renewal). Le conoscenze sulla sismogenesi e sui tassi di deformazione della penisola italiana stanno crescendo (CPTI Working Group, 2004; DISS Working Group, 2007) a un ritmo superiore a quello di altri paesi ad elevata sismicità, rispetto ai quali l'Italia può, inoltre, vantare un catalogo storico largamente superiore e quindi di potenziale sismogenico, che consente oggi di includere queste informazioni in stime probabilistiche di pericolosità sismica.

L'espansione delle reti geodetiche GPS in continuo fornisce alla comunità scientifica i dati di base per un concreto miglioramento delle conoscenze del campo di deformazione tettonico con risoluzione adeguata alla stima della pericolosità sismica (D'Agostino et al., 2009 e 2011). Il miglioramento di tali conoscenze ne rende auspicabile l'utilizzo e l'integrazione nella stima del potenziale sismico. Attraverso un confronto sistematico tra i tre bilanci di deformazione (dalle faglie, dalla sismicità e dalla geodesia) è possibile, pertanto, definire un valido modello sismotettonico per la zona.

**Il primo obiettivo del progetto** è sviluppare un modello sismotettonico per le zone in esame dove tener conto accuratamente di tutte le informazioni come input per le valutazioni di pericolosità sismica (geometrie delle sorgenti sismogenetiche individuali, tassi di deformazione, province sismotettoniche, sismicità e dati geodetici disponibili), ed integrarle con i nuovi dati raccolti durante il progetto. Questo consentirà di creare un livello di base da cui partire per un modello per la stima dei tassi e delle probabilità di occorrenza dei terremoti.

In Italia, il calcolo delle carte di pericolosità sismica viene tradizionalmente effettuato considerando sorgenti areali con tassi di sismicità di tipo Gutenberg-Richter derivati dal catalogo dei terremoti storici, modellati nel tempo tramite un processo Poissoniano.

Elaborazioni più innovative, specificatamente orientate nell'identificazione di sistemi di fagliazione attiva, assumano una funzione di hazard variabile con il tempo trascorso dall'ultimo evento che permette di introdurre il dato paleosismologico perchè caratterizzato da un tempo di ricorrenza medio e da un coefficiente di "aperiodicità" che possono essere opportunamente stimati dai dati.

**Il secondo obiettivo del progetto** è definire un modello di rottura di faglie da forti terremoti in termini di probabilità di occorrenza utilizzando sia la distribuzione di Gutenberg-Richter sia i modelli di tipo renewal che utilizzano funzioni di hazard che variano con il tempo trascorso dall'ultimo evento. Tali modelli possono utilizzare le distribuzioni statistiche di Gauss (Rikitake, 1974), di Weibull (Hagiwara, 1974), di log-normali (Nishenko and Buland, 1987), di Gamma (Utsu, 1984), e di Brownian Passage Time (Mathews et al., 2000). Il modello consente di unire le informazioni della sismicità di "background", cioè l'attività di magnitudo moderata non associata a strutture tettoniche ben determinate con una componente time-dependent basata sulle ricorrenze dei terremoti sulle faglie (Akinci et al., 2009; Marzocchi et al., 2012). E' inoltre possibile prevedere, ed inserire nel modello, la stima potenziale delle interazioni tra le strutture (la variazione dello sforzo di Coulomb) in termini della variazione delle probabilità di accadimento dei terremoti attesi. E' importante rilevare che il metodo di indagine qui proposto (con relativo modello) è stato inserito nel progetto INGV-DPC S2 e sottoposto al "Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, CSEP, Forecasting Center" di Zurigo per verificare dati sismici futuri italiani (HAZFX-BPT, Akinci, 2009). Dopo una validazione e una serie di test effettuati nell'ambito del progetto INGV-DPC-S2, simili a quelli eseguiti nell'ambito CSEP, il modello è stato verificato come un modello che fornisce stime più precise in confronto a quelli di altri modelli di Earthquake Forecasting. L'attendibilità dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del suddetto modello è subordinata ad una opportuna caratterizzazione delle principali strutture sismogenetiche della zona analizzata. I numerosi dati geologici, geodetici e tettonici relativi ad alcune zone italiane permettono di individuare le aree più adeguate per verificare questo approccio alla valutazione della pericolosità.

Le equazioni empiriche predittive del moto del suolo (Ground Motion Predictive Equations, GMPEs) sono un elemento molto importante per la valutazione della pericolosità sismica; forniscono la probabilità che un certo parametro di scuotimento del suolo superi un valore "critico" ad un sito. Numerose equazioni sono state proposte per una grande varietà di domini tettonici nella letteratura scientifica nazionale e internazionale. La scelta del tipo di GMPE da utilizzare può essere difficoltosa, in quanto esistono numerosi studi ed altrettante equazioni, che trattano il problema in modi molto differenti tra di loro.

**Il terzo obiettivo del progetto** è scegliere i modelli di attenuazione più adatti per la zona determinata delle principali province tettoniche scala nazionale e regionale e fare un sforzo verso il miglioramento delle relazioni di attenuazione nell'area studiata. In analisi di pericolosità sismica, vengono comunemente prodotte mappe in PGA (Peak Ground Acceleration) e valori dello spettro di risposta di accelerazione.

Numerose analisi di sensibilità svolte negli anni passati hanno mostrato che i risultati finali di pericolosità sono influenzati essenzialmente dalla scelta delle zone sismogeniche, dai modelli della rottura sismica e dall'attenuazione.

Quindi uno dei punti salienti del progetto e come **quarto obiettivo**, è studiare le procedure di validazione dei modelli di pericolosità sismica e di occorrenza per quantificare l'impatto dei modelli lavorando sulla sensibilità dei parametri che entrano in gioco nei modelli di pericolosità anche al fine di scegliere quelli sui quali investire più risorse, in futuro, negli altri progetti (Mmax, slip foreshocks, indicatori geochimici, geometrie del sistema di faglia, parametro b della G-R, etc).

Alle fine del progetto il modello di pericolosità sismica time-dependent come prodotto finale consentirà comunità scientifica di testare, in modo retrospettivo l'affidabilità del modello stesso.

## **2. Stato dell'arte e riferimenti bibliografici**

La pericolosità sismica è definita come la probabilità di superare un dato scuotimento del terreno in un periodo di tempo definito. La stima della pericolosità sismica è diventata la pratica comune per definire gli scenari probabilistici da utilizzare in qualsiasi politica di prevenzione dei danni derivanti dai terremoti futuri, riducendo il rischio sismico delle aree interessate.

Per la valutazione della pericolosità sismica in Italia a scala nazionale, l'approccio probabilistico proposto da Cornell (1968) è stato preso con riferimento in numerosi progetti internazionali (ad esempio, Global Seismic Hazard Assessment Project – GSHAP Giardini, 1999; SESAME, Jimenez et al., 2001; Giardini et al., 2003). Le assunzioni a fondamento del probabilismo sismotettonico Poissoniano utilizzate da questi approcci sono infatti le più adeguate per un documento di riferimento alla progettazione, che crei condizioni di esposizione al fenomeno sismico omogenee. Nel 2004 è stata rilasciata da INGV la mappa di pericolosità sismica in Italia (MPS04;<http://zonesismiche.mi.ingv.it>), adottata quale riferimento ufficiale nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri No.3519 del 2006. Anche questa mappa è stata realizzata seguendo l'approccio proposto da Cornell, sia perché era necessario utilizzare procedure di calcolo consolidate e ampiamente utilizzate in ambito internazionale, sia per ragioni di continuità e confronto con le iniziative precedenti (Slejko et al., 1998; Albarello et al., 2000). Questa mappa è stata realizzata utilizzando un gran numero di dati che erano stati appena prodotti o addirittura realizzati per tale studio: è stata utilizzata una nuova zonazione sismogenetica (ZS9, Meletti et al., 2008), un nuovo catalogo storico dei terremoti (Gruppo di Lavoro CPTI, 2004) corredato da aggiornate valutazioni degli intervalli di completezza spazio-temporale.

In diversi progetti recenti anche in Italia si è fatto riferimento a questi principi sia per individuare le faglie che possono generare terremoti potenzialmente distruttivi, sia per la stima della probabilità di accadimento di tali terremoti (ad esempio progetto GNDT, MISHA – “Metodi Innovativi per la Stima dell'Hazard” coord. L.Peruzza; progetto GNDT “Terremoti probabili in Italia tra l'anno 2000 e il 2030: elementi per la definizione di priorità degli interventi di riduzione del rischio sismico” coord. A.Amato e G.Selvaggi; progetto DPC, “Valutazione del Potenziale Sismogenetico e Probabilità dei Forti Terremoti in Italia” coord. D.Slejko e G.Valensise; progetto DPC, “Realizzazione di un Modello Dinamico Sperimentale di Valutazione della Pericolosità Sismica a Scala Nazionale” coord. W.Marzocchi e E.Faccioli).

La metodologia attualmente usata dal NSHMP 2002/2008 (National Seismic Hazard Mapping Project) negli Stati Uniti per la valutazione della pericolosità sismica descrive il potenziale sismico di una regione come somma di due contributi:

- la sismicità di “background”, cioè l'attività di magnitudo moderata non associata a strutture tettoniche ben determinate;

-la sismicità generata da faglie (o da segmenti di faglia ben definiti) determinate attraverso una procedura di consenso (WGCEP, 1995, 2002, Working Groups on California Earthquake Probabilities and UCERF1, 2007, Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version1).

La mappa finale per gli Stati Uniti è stata ottenuta integrando i diversi modelli e i diversi possibili valori per i parametri di input utilizzando un approccio di tipo “logic tree”.

Da quanto appena esposto risulta evidente che la quantità e qualità di dati necessari per il calcolo della pericolosità sismica è molto elevata; per quanto riguarda l'Italia in alcune

zone sono già disponibili numerosi dati geologici, geodetici e tettonici che permettono di adottare questo approccio per valutazione della pericolosità sismica, utilizzando il modello del terremoto caratteristico con i processi renewal. In particolare la buona caratterizzazione dei parametri geometrici e tettonici per le principali strutture sismogenetiche dell'Appennino Centrale ha già consentito un'analisi di questo tipo (ad es. Pace et al., 2006; Akinci et al., 2009; Akinci et al., 2010; Peruzza et al., 2010; Pace et al., 2010; Peruzza et al., 2011). Resta il fatto che l'applicazione di modelli diversi nell'ambito del recente progetto DPC S2 (coord. Faccioli e Marzocchi) può portare a risultati molto diversi; si rende pertanto necessario contemporaneamente la messa a punto di procedure rigorose per la validazione dei risultati che si ottengono.

Le equazioni empiriche predittive del moto del suolo (*Ground Motion Predictive Equations*, GMPEs) sono un elemento molto importante per la valutazione della pericolosità sismica. Le registrazioni *strong-motion* nel territorio italiano non sono molto numerose e per questo motivo nelle valutazioni di pericolosità sismica dell'Italia si sono usate prevalentemente relazioni di attenuazione che si basano su dati nazionali o europei. La scelta del tipo di GMPE da utilizzare può essere critica, in quanto esistono numerosi studi ed altrettante equazioni che trattano il problema in modi molto differenti tra di loro. La mappa di pericolosità sismica di riferimento per l'Italia (MPS04) ha utilizzato, combinandoli in una struttura ad albero logico, diversi modelli di attenuazione: Sabetta & Pugliese (1996), basata su dati italiani; Ambraseys et al. (1996) il modello più utilizzato a scala europea; modelli regionali elaborati su scala regionale da Malagnini et. al., (2000, 2002, 2006). L'aggiornamento del software CRISIS, realizzato nel passato progetto S2 (possibilità di includere modelli di sismicità non "poissoniani" e di inserire diversi modelli di attenuazione), rappresenta un ottimo applicativo da utilizzare ed un punto di partenza per questa linea di ricerca.

La stima delle incertezze sono una parte inseparabile degli studi di pericolosità sismica, importanti tanto quanto altri prodotti di hazard e dovrebbero fornire preziose informazioni per l'applicazione delle carte di pericolosità. Inoltre, informazioni sulle incertezze e sulla sensibilità dei parametri possono guidare la comunità di ricercatori di scienze della terra e di ingegneria nel capire quali direzioni della ricerca consentano, meglio di altre, di ridurre le incertezze nello studio della pericolosità. Questi prodotti hanno un impatto diretto sulla politica pubblica e sulle decisioni, è quindi fondamentale che questi studi sulle incertezze siano disponibili. Gli effetti di queste incertezze sulla variabilità degli scuotimenti attesi del suolo sono stati discussi per alcuni decenni, a partire da Mc-Guire (1977) e Mc-Guire & Shedlock (1981). Questi autori hanno sottolineato le ambiguità che riguardano la definizione di alcuni variabili di input per il calcolo della pericolosità ed hanno quantificato i loro effetti sugli scuotimenti attesi per gli Stati Uniti orientali. La prima descrizione completa di una metodologia capace di stimare i parametri dell'incertezza nella pericolosità sismica è stata fornita da Cramer et al. (1996; 2002). Questo approccio permette di prendere in considerazione i parametri con una distribuzione continua attraverso simulazioni Monte Carlo. La stessa metodologia di analisi è stata utilizzata per valutare le incertezze delle NSHMP negli Stati Uniti (Frankel 1995) ed è stata applicata allo studio delle incertezze sul calcolo della pericolosità sismica di Los Angeles, Ventura, Orange (Cramer et al. 1996), dell'area sismica di New Madrid e del bacino meridionale dell'Illinois (Cramer et al. 2002). Lombardi et al. (2005) hanno applicato un approccio Monte Carlo ad albero logico per l'analisi delle incertezze di un modello di pericolosità sismica probabilistico per l'Italia settentrionale e centrale. Gli autori hanno calcolato una variazione percentuale dei valori di PGA, COV, pari al 20-30% nella regione del Friuli e nell'Appennino settentrionale, e del 50-60% nell'Appennino centrale e in alcune aree delle Alpi occidentali.

Akinci et al. (2010) hanno mostrato gli effetti di modelli BPT e Poisson, insieme alle incertezze sui valori di slip rate e di massima magnitudo attesa, e di conseguenza sui tempi di ricorrenza nell'Appennino Centrale.

### **3. Descrizione del progetto**

#### **3.1 Organizzazione**

Di seguito una descrizione generale dei task e dei loro principali obiettivi. La logica connessione tra le attività è illustrata nella sezione successiva, dove la loro reciproca interaction è descritto anche al fine di conseguire gli obiettivi principali del progetto.

##### **Task 1. Definizione di un Modello Sismotectoniche nell' Appennino Meridionale**

Lo scopo di questo task è quello di utilizzare diverse informazioni sismotectoniche disponibile per la migliore caratterizzazione geologico-strutturale di questo settore dell'Appennino. RU1 con la collaborazione RU2, RU5 e DPC-S1.

##### **Task 2. Definizione di un Modello di Ricorrenza dei Terremoti per l'Appennino Meridionale**

Lo scopo di questo task è quello di sviluppare un modello in termini di probabilità di occorrenza dei terremoti maggiori utilizzando e inserendo diversi ingredienti preparati nel Task attraverso i processi misti. RU2 con la collaborazione RU1, RU4 e RU 5

##### **Task 3 Equazioni Empiriche Predittive del Moto del Suolo e dell'effetto di sito**

Lo scopo di questo task è di studiare la scelta del tipo di GMPE da utilizzare per l'Appennino meridionale. RU3 con la collaborazione RU4 e RU 5

##### **Task 4. Calcolo della Pericolosità Sismica Probabilistica ed Infrastruttura Informatica**

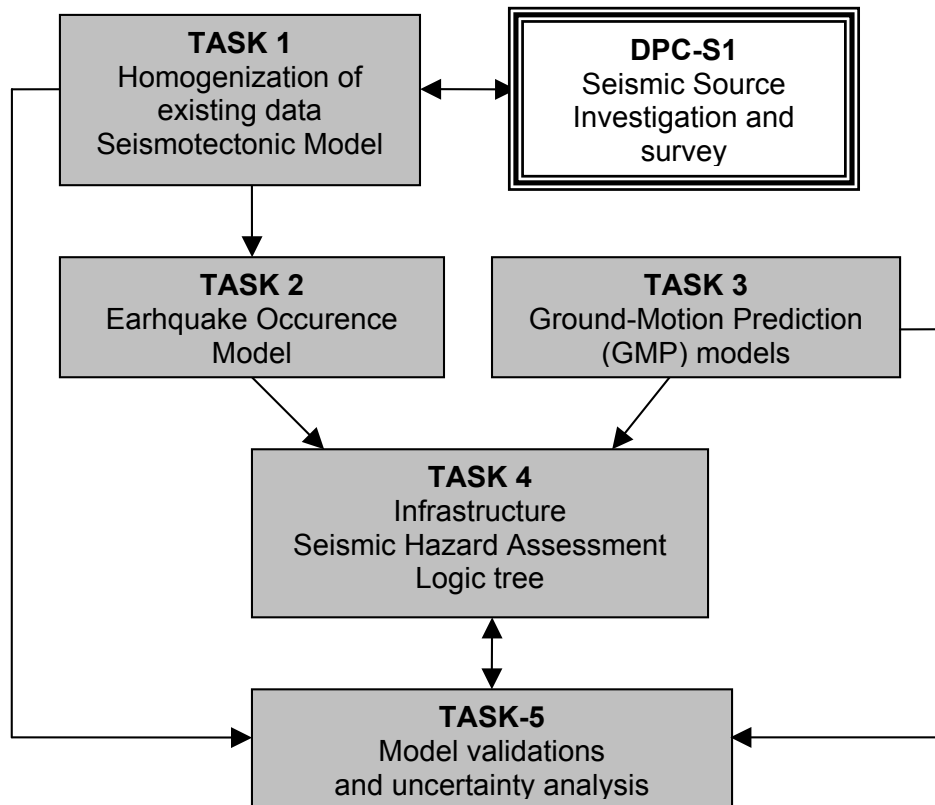
Lo scopo del task è di continuare a sviluppare il codice CRISIS2007 partendo dal progetto DPC-S2 (2007-2009) per il calcolo della pericolosità sismica attraverso l'integrazione dei diversi elementi necessari: i modelli di occorrenza dei terremoti, le relazioni frequenza-magnitudo, l'attenuazione delle misure di intensità scelte a rappresentare il moto del suolo. Eseguire calcoli di pericolosità attraverso un costruzione dell'albero logico (pesi e modelli etc.). Installare un flessibile web orientata ai servizi per la connessione di informazioni databasses pericolosità sismica con un robst motore di calcolo o di valutazione della pericolosità sismica, da impostare un sistema web-based per controllare il motore di calcolo e per fornire i risultati dei calcoli di pericolosità sismica. RU4 con la collaborazione RU2, RU3 e RU 5

##### **Task 5 Studio sulle Procedure di Validazione dei Modelli di Pericolosità Sismica e L'Analisi della Incertezza e Sensibilità**

Lo scopo di questo task è di quantificare le incertezze sulla variabilità degli scuotimenti attesi del suolo e analizzare la sensibilità dei parametri utilizzati per il calcolo della pericolosità attraverso le simulazioni di Monte Carlo e l'albero logico. RU5 con la collaborazione RU2, RU3 e RU4

##### **Task 6 Sperimentazione per La Futura Costruzione di Mappe di Pericolosità Sismica su Test Area???**

#### **3.2 Metodologia**



### 3.3 Attività

#### Task 1. Definizione di un Modello Sismotettonico nell' Appennino Meridionale

Definizione di un modello sismotettonico per l'Appennino meridionale, base di partenza per le valutazioni della pericolosità sismica, che prenderà in considerazione dati geologici quantitativi, che descrivono geometrie, cinematica e tassi di deformazione delle faglie attive già note in letteratura. La conoscenza delle principali strutture sismogeniche in diversi settori dell'Appennino Meridionale è piuttosto soddisfacente, soprattutto in termini di parametri sismotettonici (geometria, cinematica, dinamica, cronologia, ecc.) e quindi di potenziale sismogenico, permettendo oggi di includere queste informazioni nelle stime probabilistiche di pericolosità sismica.

L'obiettivo di questa unità di ricerca è quello di utilizzare tutte le informazioni sismotettoniche disponibili, in termini di geometrie delle strutture, distribuzione della sismicità storica e strumentale, associazioni terremoto-struttura e tassi di deformazione, per ottenere scenari probabilistici aggiornati di pericolosità sismica per l'Appennino meridionale. La UR si baserà inizialmente su esperienze già sviluppate dall'INGV, Il sistema DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) e anche esperienze svolte in precedenza dal GNDT (sottoprogetto 5.1.2 .Inventario delle faglie attive e dei terremoti ad esse associabili) ed in altri ambiti (es.: progetto Ithaca avviato dall'A.N.P.A., oggi A.P.A.T.).

#### *Task 1.1 Le Faglie Attive con le principali caratteristiche sismotettoniche e la quantificazioni delle incertezze*

L'obiettivo del presente task consiste nell'individuazione delle sorgenti atte a produrre terremoti potenzialmente distruttivi e nel calcolo della probabilità che tali terremoti si verifichino nel futuro e definire le principali caratteristiche delle faglie (es. Slip-rate, periodo di ritorno, l'ultimo evento, ecc.). Nell'ambito del progetto UR1 saranno utilizzate le

informazioni raccolte dal progetto S1 (S1.c e d). Rappresentare e classificare dalle faglie tipo A e B nella divisione proposta dal WGCEP (2007). Tipo A: contengono segmenti di faglia maggiore, noti dai dati paleosismologici sufficienti per stimare la probabilità condizionata di accadimento di un certo evento, e quindi modellabile in dipendenza dal tempo trascorso dall'ultimo evento; Tipo B: faglie attive con slip rate misurabile, ma dati di segmentazione, spostamento, datazione dell'ultimo evento inadeguati, modellabile come evento caratteristico poissoniano, ovvero non legato al tempo. Tipo C: zone non dominate da una faglia maggiore, con faglie diverse o nascoste, in cui la sismicità viene assunta distribuita ed uniforme, nello spazio e nel tempo.

### *Task 1.2 Utilizzo dei dati di deformazione geodetica per la valutazione della pericolosità sismica*

L'utilizzo di tecniche geodetiche per la misurazione della deformazione crostale ha visto, con lo sviluppo del GPS, un aumento significativo delle applicazioni rilevanti per la valutazione della pericolosità sismica. Possiamo suddividere i risultati dell'applicazione delle tecniche geodetiche allo studio della deformazione crostale e alla valutazione della pericolosità in due campi principali.

- Valutazione del tasso di accumulo di deformazione crostale sulle singole strutture sismogeniche. Nell'ipotesi di stazionarietà della deformazione tettonica si può misurare la deformazione intersismica elastica nel volume crostale comprendente le strutture sismogeniche indagate. Assumendo che questo tasso di accumulo sia rilasciato sismicamente, si può convertire questa stima in uno "slip rate geodetico" della faglia in esame.
- Definizione del momento "geodetico". Il confronto tra tasso di rilascio sismico (storico) e tasso di accumulo del momento sismico (geodetico) permette, quindi, di valutare la percentuale di deformazione tettonica rilasciata sismicamente. (vede anche l'aseismic slip factors e crustal shear zones)

### *Task 1.3 Definire il modello di interazione co- e post-sismico tra le faglie*

Analisi delle possibili interazioni tra strutture, in termini di variazione delle probabilità di accadimento dei terremoti maggiori, attraverso la valutazione delle variazioni degli sforzi di Coulomb, per migliorare gli scenari di pericolosità.

## **Task 2. Definizione di un modello di ricorrenza dei terremoti per l'Appennino Meridionale**

Il modello di ricorrenza descrive il potenziale sismico di una regione come somma di due contributi:

- 1- La sismicità di "background", cioè l'attività di magnitudo moderata non associata a strutture tettoniche ben determinate.
- 2- La sismicità generata da faglie o da segmenti di faglia ben definiti. Il modello unisce diversi componenti basando sui processi misti.

*Task 2.1 Calcolo del potenziale sismico dovuto all'attività di background* mediante il metodo elaborato da Frankel (1995), basato su uno *smoothing spaziale* della sismicità storica. Gli eventi non sono assegnati a specifiche faglie, ma a celle di uguale dimensione, nelle quali viene suddivisa la regione in esame. Ognuna di esse è una potenziale sorgente per eventi di magnitudo moderata (inferiore ad una certa soglia opportunamente prescelta). Assumiamo la ricorrenza di tali eventi in accordo con la legge di Gutenberg-Richter, con un b-value stimato dal catalogo storico; tale stima prevede una preventiva analisi degli intervalli di completezza della sismicità storica per la zona prescelta.

*Task 2.2 Definizione della magnitudo e tempo di ricorrenza* in accordo con il modello del terremoto caratteristico per le faglie relativa agli eventi di magnitudo più elevata. La magnitudo “caratteristica” della singola sorgente è calcolata mediante le relazioni come Wells e Coppersmith (1994); i tempi di ricorrenza sono ottenuti integrando le informazioni fornite dalla sismicità storica, i modelli tettonici, la paleosismologia ed i valori dello slip rate. Nel caso in cui il modello caratteristico non si possa utilizzare per alcune strutture, si può utilizzare il modello a floating fault, ovvero a cascading con i possibili interazioni tra strutture.

*Task 2.3 Una modellazione dello strain rate* viene applicata per le zone dove le faglie non sono ben-definite, e dove i dati geodetici o sismologici indicano un elevato livello di deformazione. Quanto descritto si può implementare utilizzando i dati geodetici e la formula di Kostrov (1974) per convertire il rateo di deformazione in rateo di rilascio di momento.

*Task 2.4 Modellazione della distribuzione temporale degli eventi generati da una specifica struttura* secondo due modelli: uno *time-independent* (poissoniano) ed uno *time-dependent* di tipo renewal. Il primo assume che la probabilità di occorrenza del terremoto caratteristico non cambi in funzione del tempo trascorso dall’ultimo evento; il tempo medio di ricorrenza è calcolato a partire dal tempo di ritorno caratteristico della faglia. Il secondo modello assume una funzione di hazard variabile con il tempo trascorso dall’ultimo evento. Oltre ai modelli classici “time-dependent”, particolare attenzione sarà data al modello “*Brownian-Passage-Time*, che permette di introdurre il dato paleosismologico perchè caratterizzato da un tempo di ricorrenza medio e da un coefficiente di “aperiodicità” stimati opportunamente da questi dati.

*Task 2.5. Magnitude-Frequency Tests.*

### **Task 3 Equazioni Empiriche Predittive del Moto del Suolo**

Un altro ingrediente fondamentale in studi di pericolosità sismica è la scelta delle equazioni predittive dello scuotimento del suolo (GMPE) Kramer 1996. GMPE sono state sviluppate per molte aree del mondo, essenzialmente facendo regressioni di dati strong-motion (Boore & Atkinson 2007; Campbell & Bozorgnia 2006; Ambraseys et al. 2005; Akkar & Bommer, 2010). Nonostante la disponibilità di numerosi studi, molti progressi devono ancora essere fatti in questo campo. Uno di questi riguarda la differenziazione regionale della propagazione delle onde (es. Boore 1983, Benz et al. 1997), come osservato in regioni relativamente piccole (es. California Boatwright et al. 2003). Le caratteristiche della sorgente sismica e della propagazione delle onde in Europa sono piuttosto complesse e l’approccio alle GMPE sta cambiando. Equazioni di strong-motion globali potrebbero non predire lo scuotimento del suolo dovuto a terremoti da piccoli a moderati e quindi l’analisi sulla caratterizzazione regionale è importante per studi di pericolosità sismica. La valutazione della pericolosità sismica in termini dello spettro di risposta è essenziale ai fini di una definizione dello spettro di progetto. Inoltre, la prassi attuale che consiste nell’applicazione di una legge di attenuazione univoca su tutto il territorio nazionale, non tiene conto delle possibili differenze esistenti fra le varie zone. Si tratta quindi di costruire leggi di attenuazione in PGA e in ordinate spettrali e possibilmente di definire tali leggi per contesti regionali.

*Task 3.1 Equazioni Empiriche Predittive adatte per l’Appennino Meridionale*

*Task 3.2 Empirical-Stochastic Regionalized Ground-Motion Predictions*

Compilazione del data base (tutti gli eventi registrati dalla rete INGV), generazione delle GMPE con i dati weak-motion, generazione di un data base sintetico (faglia estesa) ed utilizzo dei dati sintetici nelle procedure di calcolo delle GMPE.

#### *Task 3.3 Generalized Ground Motion Simulations*

Il ricorso al calcolo deterministico, su base fisica, di sismogrammi sintetici, oltre condurre una classe generalizzata di modello di attenuazione.

### **Task 4. Valutazione della Pericolosità Sismica e Infrastruttura Informatica**

Il task ha i seguenti obiettivi: Impostare procedure di controllo di qualità e le caratteristiche tecniche di valutazione della pericolosità che permettano la convalida completa della procedura di valutazione della pericolosità e dei risultati. Valutare la pericolosità sismica secondo le specifiche di gruppo di lavoro condurre la validazione, da attuarsi con feedback comunità. procedura di controllo qualità e input-output specifiche.

#### *Task 4.1 Sviluppare dei codici di software CRISIS*

#### *Task 4.2 Progettazione di un alberologico e calcolo della pericolosità sismica*

*Task 4.3 Costruire e validare l'infrastruttura informatica* di base (sia hardware che software) per consentire in un modo uniforme la valutazione della pericolosità sismica nella zona e la distribuzione di tali valutazioni a una varietà di utenti finali.

*Task 4.4 Installare un flessibile web* un'architettura orientata ai servizi per la connessione di informazioni della pericolosità sismica con un robust motore di calcolo o di valutazione della pericolosità sismica, e impostare un sistema web-based per controllare il motore di calcolo e per fornire i risultati dai calcoli di pericolosità sismica.

### **Task 5 Studio sulle procedure di validazione dei modelli di pericolosità sismica e l'analisi della incertezza e sensibilità**

Numerose analisi di sensibilità svolte negli anni passati hanno mostrato che i risultati finali di pericolosità sono influenzati essenzialmente dalla scelta delle zone sismogeniche, dai modelli di ricorrenze e dall'*GMPEs*.

Lo scopo di questo task è analizzare le incertezze nelle valutazioni di pericolosità sismica per quantificare l'impatto del modello. Messa a punto di test di sensibilità dei parametri che entrano in gioco nei modelli di pericolosità anche al fine di scegliere quelli sui quali investire più risorse negli altri progetti e negli anni futuri ( $M_{max}$ , slip rates, foreshocks, indicatori geochimici, geometrie del sistema di faglia, parametro  $b$  della  $G-R$ , etc). Sviluppo di simulazioni numeriche per testare modelli di occorrenza dei terremoti (individuazione o creazione ex-novo di un simulatore numerico di eventi sismici con analisi del tempo medio di ritorno, della distribuzione di probabilità, dei valori di aperiodicità, e test di validazione di modelli noti).

#### *Task 5.1 Test retrospettivi per la validazione di modelli di pericolosità*

#### *Task 5.2 Test di confronto fra diversi metodi di calcolo della pericolosità sismica*

#### *Task 5.3 Analisi sulle incertezze e sulla sensibilità dei parametri utilizzati ai fini della pericolosità sismica*

#### *Task 5.4. Sviluppo di simulazioni numeriche per testare modelli di occorrenza dei terremoti*

Lo sviluppo di modelli numerici per testare modelli di occorrenza avrebbe lo scopo di studiare e comprendere:

- (a) la lunghezza di un record storico di terremoti necessaria ad investigare la stabilità o la variabilità del tempo medio di ricorrenza e della sua aperiodicità,
- (b) quale tra le diverse funzioni di probabilità oggi comunemente utilizzate nella stima delle probabilità di occorrenza, fornisca i migliori risultati in termini di previsione. (Magnitude-Frequency, Integrated Strain Tensor Test).

#### **Task 6. Sperimentazione per la futura costruzione di mappe di pericolosità sismica su test area???**

##### **Principali Prodotti Attesi**

###### *Primo anno*

- Database delle caratteristiche delle faglie dell' Appennino Meridionale per utilizzo il calcolo di pericolosità sismica
- Il modello sismotettonico per l'Appennino Meridionale
- Mappe di strain rate tettonico e di potenziale sismico per magnitudo al di sopra di una soglia determinata secondo la metodologia illustrata in Ward (2007)
- Modelli di ricorrenza per la sismicità di background nell' Appennino Meridionale
- Modelli di ricorrenza per terremoti forti dell'Appennino Meridionale

###### *Secondo anno???*

- Modelli di pericolosità sismica in Appennino Meridionale
- Test retrospettivi per la validazione di modelli di pericolosità sismica che utilizzano approcci differenti.
- Test di sensibilità dei parametri che entrano in gioco nei modelli di pericolosità
- Test di confronto fra diversi metodi di calcolo della pericolosità sismica

###### *Terzo anno???*

- Modelli di pericolosità sismica in Appennino Meridionale
- Mappe di pericolosità (PGA e 0.3 E 1Hz SA; massima intensità???) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni.
- Mappe del Coefficiente di Variazione per ogni parametro di input introdotto nel logic tree e per la variabilità globale

##### **Riferimenti Bibliografici**

- Akinci, A., D. Perkins, A.M. Lombardi and R. Basili, Uncertainties in the estimation of the probability of occurrence of strong earthquakes from individual seismological sources in the Apennines, Italy, *J. of Seism.*, 14, 95-117, 2010.
- Akinci; A. HAZGRIDX: earthquake forecasting model for  $ML \geq 5.0$  earthquakes in Italy based on spatially smoothed seismicity, *Annals of Geophysics*, 2010
- Akinci; A., F. Galadini, D. Pantosti, M. Petersen, L. Malagnini and D. Perkins, Effect of time dependence on probabilistic seismic hazard maps and deaggregation for the central Apennines, Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 585-610, 2009.
- Albarelo D., Meletti C., Earthquake forecasting and hazard assessment: a preface, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* Volume: 53 Issue: 1 Pages: 1-5 DOI: 10.4430/bgta0058, 2012
- Albarelo D. and Mucciarelli M.; 2002: Seismic hazard estimates using ill-defined macroseismic data at site. *Pure Appl. Geophys.*, 159, 1289-1304.
- Albarelo D., Bosi, V., Brammerini F., Lucantoni A., Naso G., Peruzza L., Rebez A., Sabetta F., Slejko D.; 2000: Carte di pericolosità sismica del territorio nazionale. Quaderni di Geofisica, 12 Editrice compositori, Bologna, 7 pp.
- Ambraseys N.N., Simpson K.A. and Bommer J.J.; 1996: Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earth. Eng. Struct. Dyn.*, 25, 371-400.
- Bindi, D., Luzi, L., Massa, M., Pacor, F.; 2010: Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA). *Bull. Earthquake Engineering*, 8, 1209-1230, doi: 10.1007/s10518-009-9130-9.
- Bragato P.L. and Slejko D.; 2005: Empirical ground-motion attenuation relations for the Eastern Alps in the magnitude range 2.5 - 6.3. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, 252-276.

- Cauzzi C. and Faccioli E.; 2008: Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *J Seismol.*, 12, 453-475, doi 10.1007/s10950-008-9098-y.
- Cowie P, Roberts GP, Bull JM and Visini F (2012) Relationships between fault geometry, slip rate variability and earthquake recurrence in extensional settings. *GJI*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05378.x
- Zoller G and Hainzl S (2010). Recurrence time distributions of large earthquakes in a stochastic model for coupled fault systems: the role of fault interaction. *BSSA*, 97, doi: 10.1785/0120060262.
- Grimaz S.; 2009: Seismic site effects estimation from Probit analysis of the data of 1976 Friuli earthquake (NE of Italy). *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 50, 319-337
- Gruppo di Lavoro MS-AQ (2010), "Parte II-Gli studi di microzonazione sismica" e "Parte III - Microzonazione sismica delle macroaree (macroaree 1 e 2)". In: *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*. vol. 3, p. 3-86, L'Aquila:Regione Abruzzo ? Dipartimento della Protezione Civile, 2 vols. e 1 DVD.
- Gruppo di Lavoro; 2004: Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano - Roma, 65 pp. + 5 App.
- D'Agostino, N., S. Mantenuto, E. D'Anastasio, A. Avallone, G. Selvaggi, M. Barchi, C. Collettini, F. Radicioni, A. Stoppini, and F. Fastellini (2009), Contemporary crustal extension in the Umbria-Marche Apennines from regional CGPS networks and comparison between geodetic and seismic deformation, *Tectonophysics*, 476, 3–12, doi:10.1016/j.tecto.2008.09.033.
- D'Agostino, N., Mantenuto, S., D'Anastasio, E., Giuliani, R., Mattone, M., Calcaterra, S., Gambino, P., Bonci, L., 2011. Evidence for localized active extension in the central Apennines (Italy) from global positioning system observations. *Geology* 39, 291–294. doi:10.1130/G31796.1.
- Holzer T.L., Padovani A.C., Bennett M.J., Noce T.E. and Tinsley J.C.; 2005: Mapping NEHRP VS30 site classes. *Earthquake Spectra*, 21, 353-370.
- Malagnini, L., A. Akinci, K. Mayeda, I. Munafo', R.B. Herrmann, and A. Mercuri (2011). Characterization of Earthquake-Induced Ground Motion from the L'Aquila Seismic Sequence of 2009, Italy, *Geophys. J. Int.*, *Geophys. J. Int.* **184**, 325–337, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04837.x
- Malagnini, L., L. Scognamiglio, A. Mercuri, A. Akinci, and K. Mayeda (2008). Strong evidence for non-similar earthquake source scaling in Central Italy, *Geophys. Res. Lett.*, 35, LXXXXXX, doi: 10.1029/2008GL034310.
- Malagnini, L., Akinci, A., Herrmann, R. B., Pino, N.A., Scognamiglio, L., (2002). Characteristics of the ground motion in Northeastern Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 2186-2204 .
- Malagnini, L., Herrmann, R.B., and M. Di Bona (2000). Ground motion scaling in the Apennines (Italy). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1062-1081.
- Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba S., Vannucci G., Boschi E.; 2008: A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics*, 450, 85–108.
- Pace B., L. Peruzza, G. Lavecchia, P. Boncio Layered seismogenic source model and probabilistic seismic-hazard analyses in Central Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, 107-132, doi:10.1785/0120040231, 2006.
- Pace, B., L. Peruzza, F. Visini, LASSCI2009.2: layered earthquake rupture forecast model for central Italy, submitted to the CSEP project, *Annals of Geophysics*, 53, 85-97, 2010.
- Peruzza L., B. Pace, and F. Visini, Fault-Based Earthquake Rupture Forecast in Central Italy: Remarks after the L'Aquila Mw 6.3 Event , *Bull. of the Seism. Soc. of Am. (Short Note)*, , v. 101, p. 404-412, 2011.
- Sabetta F. and Pugliese A.; 1996: Estimation of response spectra and simulation of nonstationarity earthquake ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 337-352.
- Slejko D. and Bragato P.L.; 2008: New ground motion attenuation relations for N.E. Italy and their application to the regional seismic hazard assessment. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 49, 315-327.
- Slejko D., Caporali A., Stirling M. and Barba S.; 2010: Occurrence probability of moderate to large earthquakes in Italy based on new geophysical methods. *J. Seismol.*, 14, 27-51, DOI 10.1007/s10950-009-9175-x.
- Slejko D., Carulli G.B., Garcia J. and Santulin M.; 2011: The contribution of “silent” faults to the seismic hazard of the northern Adriatic Sea. *J. Geodyn.*, 51, 166-178, doi: 10.1016/j.jog.2010.04.009.
- Slejko D., Carulli G.B., Ruscetti M., Cucchi F., Grimaz S., Rebez A., Accaino F., Affatato A., Biolchi S., Nieto D., Puntel E., Sanò T., Santulin M., Tinivella U. and Zini L.; 2011: Soil characterization and seismic hazard maps for the Friuli Venezia Giulia region (NE Italy). *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 52, 59-104.
- Slejko D., Peruzza L. and Rebez A.; 1998: Seismic hazard maps of Italy. *Annali di Geofisica*, 41, 183-214.
- Slejko D., Rebez A. and Santulin M.; 2008: Seismic hazard estimates for the Vittorio Veneto broader area (N.E. Italy) *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 49, 329-356.
- Toro G.R., Abrahamson N.A. and Schneider J.F.; 1997: Model of strong motions from earthquakes in central and eastern North America: best estimates and uncertainties. *Seism. Res. Lett.*, 68, 41-57.
- Ward S. (2007) Methods for Evaluating Earthquake Potential and Likelihood in and around California, *SRL*, 78(1), 121-133.
- WG-CEP 2008. USGS Open-File Report 2007-1437 and California Geol. Survey Special Report 203
- Working Group MPS 2004. [zonesismiche.mi.ingv.it](http://zonesismiche.mi.ingv.it)