



Progetto S3 – Scenari di scuotimento in aree di interesse prioritario e/o strategico

Responsabili: Francesca Pacor (INGV-MI) e Marco Mucciarelli (Unibas)

TASK 1 – SCENARI DI SCUOTIMENTO - DELIVERABLE D1

LINEE GUIDA PER IL CALCOLO DEGLI SCENARI DI SCUOTIMENTO

A cura di

UR1 - G. Franceschina, F. Pacor, G. Zonno, G. Ameri

UR2 - G. Cultrera, A. Cirella, A. Herrero, E. Spagnuolo, E. Tinti

UR6 - M. Mucciarelli

UR10 - A. Emolo, V. Convertito

Luglio 2007

INDICE

1. DEFINIZIONE DI SCENARIO	3
1.1 APPROCCIO DETERMINISTICO	3
1.2 APPROCCIO PROBABILISTICO	4
1.3 SCELTA DELL'APPROCCIO PER LA STIMA DELLA PERICOLOSITÀ	5
2. LIVELLI DI COMPLESSITÀ	6
3. VARIABILITÀ DEGLI SCENARI	8
4. AREE DI STUDIO.....	16
4.1 GUBBIO	16
4.1.1 Calibrazione	16
4.1.2 Scenari di livello 0 e 1	18
4.2 POTENZA.....	21
4.2.1 Definizione delle sorgenti sismogenetiche e scenari di livello 1	21
4.2.2 Scenari di livello 2	23
4.3 GARDA	26
4.3.1 Livello 0.....	26
4.3.2 Livello 1.....	28
4.3.3 Confronto fra scenari a diverso livello di complessità.....	30
4.4 MOLISE.....	33
4.4.1 Livello 0.....	33
4.4.2 Livello1.....	34
4.4.3 Livello2.....	37
4.4.4. Confronto fra scenari a diverso livello di complessità.....	38
5. CONCLUSIONI.....	41
BIBLIOGRAFIA.....	45
APPENDICE 1: TECNICHE DI SIMULAZIONE	48
APPENDICE 2: PARAMETRI CINEMATICI DELLA SORGENTE SISMICA	49
APPENDICE 3: STUDIO PARAMETRICO	52

1. DEFINIZIONE DI SCENARIO

L'analisi dinamica del livello di sicurezza ingegneristico, in particolare per strutture strategiche in una zona ad elevato potenziale sismogenetico, tiene conto dei parametri di picco e di diverse caratteristiche del moto del suolo, come ad esempio la durata, la "non-stazionarietà" e i "critical-pulse" (McGuire, 1995). Di conseguenza, è richiesta una modellazione dettagliata sia della struttura sia dell'input sismico necessario a verificarne la risposta sismica.

I codici per la progettazione in zona sismica richiedono che l'input sismico per le analisi dinamiche sia composto da un set di "time-histories" a cui la struttura deve resistere durante la sua esistenza, e da un livello di pericolosità caratteristico della zona sismogenetica in cui la struttura di interesse è ubicata. A tale scopo l'input sismico e la pericolosità di un'area sono stimati con approcci di tipo deterministico o probabilistico.

La scelta dell'approccio da adottare per le valutazioni di pericolosità non è immediata, poiché i due metodi sono molto diversi e presentano entrambi vantaggi e svantaggi. In generale l'approccio deterministico valuta l'entità del moto sismico causato da uno specifico evento di cui si considera nota la localizzazione e la magnitudo; l'approccio probabilistico definisce invece la probabilità che un determinato parametro dello scuotimento sia superato in un particolare intervallo temporale (ad esempio 10% di probabilità di superamento in 50 anni) a partire dallo studio sulla sismicità dell'area.

La differenza fondamentale tra l'approccio deterministico e quello probabilistico è che nel primo vengono simulate le serie temporali, ma non si associa alcuna probabilità al parametro di scuotimento valutato, viceversa nel secondo sono descritti solo alcuni parametri del moto e la probabilità è inclusa direttamente nell'analisi.

1.1 APPROCCIO DETERMINISTICO

Lo scenario di scuotimento deterministico o *deterministic seismic hazard analysis* (DSHA) rappresenta una stima del moto sismico che una o più sorgenti sismogenetiche ben identificate possono generare ad uno o più siti. I vari contributi che concorrono alla definizione del moto in uno studio di scenario (sorgente, mezzo di propagazione e risposta locale) sono calcolati con tecniche deterministiche più o meno complicate.

Schematicamente, uno studio di scenario deterministico può essere riassunto nei seguenti passaggi:

- individuazione delle faglie sismogenetiche di interesse e definizione delle caratteristiche geometriche e sismologiche (momento sismico, meccanismo focale, massimo spostamento);
- definizione della struttura delle caratteristiche reologiche del mezzo di propagazione tramite velocità delle onde sismiche, densità e fattore di qualità o fornendo i parametri del modello di attenuazione e dello *spreading* geometrico;
- definizione dei valori dei parametri cinematici descrittivi il processo di rottura (enucleazioni, distribuzioni di slip, rise time, velocità di rottura);
- applicazione di modelli empirici predittivi (MEP) e/o di tecniche di simulazione del moto sismico;

Lo scenario di scuotimento viene generalmente rappresentato dai sismogrammi sintetici oppure da uno o più parametri *strong-motion*, quali i valori di picco dell'accelerazione, velocità e spostamento, ordinate spettrali a periodi fissati.

In particolare, se si vuole riprodurre il moto sismico di un evento sismico del passato, si utilizzano tutte le informazioni disponibili per fornire un unico valore dei parametri *strong-motion* o un singolo sismogramma sintetico rappresentativo dell'evento. Viceversa, lo studio di previsione del moto sismico per terremoti che potrebbero verificarsi in futuro, si basa sull'ipotesi che le strutture sismogenetiche si attivino nell'area in esame. In questo caso i parametri che descrivono i processi alla sorgente dei terremoti futuri (stress drop, velocità di rottura, punto di enucleazione, etc.) non sono noti e lo studio di scenario fornisce un intervallo di valori dei parametri *strong motion*, rappresentativo delle diverse ipotesi considerate nei modelli di rottura della sorgente sismica.

1.2 APPROCCIO PROBABILISTICO

L'analisi probabilistica della pericolosità sismica (PSHA; Cornell, 1968) è una delle tecniche maggiormente utilizzate per valutare l'impatto dei terremoti che avvengono in diverse zone sismogenetiche. Per definizione (Reiter, 1990), queste ultime sono delle zone a potenziale sismogenetico uniforme la cui geometria, sulla base dei dati disponibili (sismologici, paleosismologici, geologici, etc...) e della finalità dell'analisi che si sta effettuando, può essere un punto, una linea, un'area o un volume. In generale le zone sismogenetiche vengono definite nelle regioni per le quali le singole strutture in grado di generare forti terremoti non sono facilmente identificabili oppure quando il potenziale sismogenetico è distribuito su diverse sorgenti.

In modo molto schematico, l'analisi probabilistica si svolge attraverso i seguenti passaggi:

- Individuazione delle zone sismogenetiche e/o delle singole faglie.
- Stima dei tassi di ricorrenza: relazione di Gutenberg e Richter per le zone sismogenetiche, e di Young e Coppersmith (1985) per le singole faglie.
- *Slip rate* medio per la zona sismogenetica considerata o della zona sismogenetica che include la singola faglia.
- Applicazione dei modelli empirici predittivi per i parametri del moto (PGA, PGV, Sa(T))
- Selezione dei periodi di interesse e delle frequenze di superamento

Il risultato di un'analisi PSHA al sito d'interesse è una curva di *hazard* che fornisce i valori di un parametro del moto del suolo di interesse (ad esempio, parametri di picco, ordinate spettrali, ecc.) in funzione della probabilità di superamento in un assegnato periodo di tempo. Ciascun valore della curva tiene conto dell'effetto integrato di tutti i terremoti di diversa magnitudo, caratterizzati da diversi tassi di sismicità e che possono avvenire nelle zone sismogenetiche considerate.

In molti casi, tuttavia, è utile isolare le sorgenti che maggiormente contribuiscono alla pericolosità del sito. Se per il sito di interesse è stata effettuata un'analisi di tipo probabilistico (PSHA; Cornell, 1968), le sorgenti possono essere identificate dalla

distanza al sito e dalla magnitudo associata. La coppia magnitudo-distanza definisce il “terremoto di progetto” (design earthquake) e permette di selezionare le serie temporali da un database esistente o ottenute da studi deterministici di scenario.

E’ diventata pratica comune applicare la tecnica della “deaggregazione” (McGuire et al., 1981; McGuire, 1995; Chapman, 1995; Bazzurro et al., 1999) per l’identificazione del terremoto di progetto. Questa tecnica calcola il contributo relativo delle diverse zone sismogenetiche, caratterizzate ciascuna da una propria geometria, da una relazione di ricorrenza e da una magnitudo massima. Tali contributi sono espressi mediante densità di probabilità congiunte o marginali (PDF) delle variabili di *hazard*, ovvero magnitudo, distanza sito-sorgente, incertezze nei modelli empirici predittivi. L’analisi di tali PDF consente quindi di identificare la coppia magnitudo-distanza rappresentativa di diversi stimatori statistici della distribuzione di probabilità, quali il valore medio o la mediana.

1.3 SCELTA DELL’APPROCCIO PER LA STIMA DELLA PERICOLOSITÀ

Quale sia l’approccio migliore da utilizzare per le stime di pericolosità ad un sito è un argomento molto controverso al quale non è possibile dare una risposta univoca. McGuire (1995) afferma che i due metodi dovrebbero essere usati in modo complementare al fine di giungere ad una migliore definizione della pericolosità di una data area. La priorità di un approccio rispetto ad un altro dipende, oltre che dal contesto sismotettonico, dallo scopo del progetto per cui vengono svolte le analisi di pericolosità. Ad esempio, quando il sito di interesse è una struttura strategica, come impianti industriali ad alto rischio diretto ed indotto, ospedali, scuole, ponti, ecc., l’applicazione della PSHA non è ovvia. In tal caso, infatti, può essere richiesta la selezione e la caratterizzazione del moto generato da una singola faglia invece che da una zona sismogenetica. Il calcolo della PSHA per una singola faglia comporta alcune difficoltà non trascurabili: non è sempre possibile stimare il tasso di sismicità e la relazione di ricorrenza di una singola faglia con terremoto massimo atteso di magnitudo medio-alta ($M > 6.0$), a causa della non completezza dei cataloghi sismici attualmente disponibili; le relazioni di attenuazione utilizzate per calcolare l’effetto del terremoto, può non tener conto delle caratteristiche del processo di rottura sulla faglia (geometria della faglia, distribuzione di slip, direttività, ecc.) e della propagazione delle onde sismiche dalla sorgente al ricevitore (Boore et al., 1997; Sommerville et al., 1997; Convertito and Herrero, 2004).

Queste caratteristiche, d’altra parte, risultano essere di particolare importanza per quei siti ubicati a distanze confrontabili con le dimensioni della faglia considerata, per cui l’eterogeneità e la complessità del processo di rottura alla sorgente è ritenuta responsabile della complessità del moto del suolo alle alte frequenze; i modelli empirici predittivi, strumento utilizzato per calcolare l’effetto del terremoto nella PSHA, generalmente non ne tengono conto di tali effetti.

Un possibile uso congiunto dei due approcci consiste nello svolgere inizialmente un’analisi probabilistica per stimare la pericolosità al sito e quindi un’analisi di deaggregazione per identificare gli eventi che vi contribuiscono maggiormente. Gli eventi così individuati vengono successivamente modellati con approcci deterministici al grado di dettaglio desiderato. Recentemente Convertito et al. (2006)

hanno sviluppato un nuovo approccio ibrido probabilistico-deterministico per l'analisi della pericolosità sismica con lo scopo di superare alcune delle limitazioni intrinseche dei due approcci standard (per dettagli si veda *PS3-Deliverable D2*).

Nell'approccio ibrido viene utilizzata una tecnica di simulazione di sismogrammi sintetici per riprodurre il moto del suolo atteso al sito nel caso della rottura di una faglia estesa.

Tenendo conto della variabilità associata a diversi possibili processi di rottura che su di essa si possono sviluppare (ad esempio, posizione del punto di enucleazione della rottura, distribuzione della dislocazione finale sulla faglia, valore della velocità di rottura), si ottiene una densità di probabilità dei parametri *ground-motion* da utilizzare per il calcolo probabilistico.

Ciò consente di limitare la generalità delle stime dei parametri del moto che sono ottenute mediante i modelli empirici predittivi per sorgenti puntiformi e condizioni di sito semplificate, e di tener conto degli effetti che maggiormente influenzano il campo d'onda in particolar modo nell'area *near-source*, come il diagramma di radiazione e l'effetto di direttività.

Al tempo stesso il metodo prevede la possibilità di associare all'approccio deterministico il tempo di ritorno del terremoto scelto per caratterizzare il potenziale sismogenetico della faglia selezionata, evitando così la "staticità" degli scenari calcolati.

2. LIVELLI DI COMPLESSITÀ

In questo progetto è stata introdotta una classificazione per gli scenari di scuotimento deterministici calcolati al *bedrock*. Tale classificazione rappresenta tre livelli di complessità (livello 0, livello 1 e livello 2) dipendenti dalla tecnica di calcolo utilizzata per la stima del moto atteso insieme alla sua variabilità, come illustrato in Tabella 2.1.

Gli scenari di livello 0 si basano sull'utilizzo di metodologie semplificate che prevedono l'applicazione di modelli empirici predittivi (MEP) del moto sismico. Essi forniscono, per un dato terremoto e uno specifico sito, una stima del moto corrispondente al valor medio dei parametri di picco con associata la loro variabilità (deviazioni standard).

Gli scenari di livello 1 e 2 sono basati sui sismogrammi sintetici calcolati per modelli di sorgente puntuale e a faglia estesa e per in mezzi di propagazione omogenei e stratificati: negli scenari di livello 1 si utilizzano tecniche numeriche approssimate che simulano la fase *strong motion* del sismogramma; negli scenari di livello 2 si adottano metodi ibridi che generano sismogrammi sintetici a larga banda in campo completo (si veda *PS3-Deliverable D0*). In questo modo gli scenari di scuotimento più complessi (livelli 1 e 2) includono effetti importanti dei terremoti, quali ad esempio la direttività e gli impulsi a bassa frequenza misurabili a distanze dalla sorgente confrontabili con le dimensioni della faglia sismogenetica. Inoltre, il calcolo delle serie temporali permette di definire il moto atteso attraverso un'ampia gamma di parametri *ground-motion* che include sia i valori di picco che le grandezze integrali (quali Housner o l'intensità di Arias).

Variando i diversi parametri che descrivono sia la rottura sulla faglia estesa sia il mezzo di propagazione si possono calcolare diversi scenari per un dato terremoto e

un dato sito. Per ogni sito si ottiene quindi una distribuzione di parametri *ground-motion* da cui stimare degli indicatori statistici che descrivano il moto atteso (la media, la mediana, il valore massimo etc.) insieme alla sua variabilità (deviazione standard, percentili, ecc). Ad ogni indicatore è possibile associare uno o più sismogrammi corrispondenti o definire una famiglia di sismogrammi che soddisfi criteri specifici (ad esempio i 7 accelerogrammi più vicini al valore mediano).

	Tecniche	Grandezze simulate	Variabilità associata
Livello 0	Modelli empirici predittivi del moto del suolo a scala regionale e nazionale (MEP, già chiamate leggi di attenuazione)	Valori di picco (PGA, PGV, PGD) Ordinate spettrali in intervalli di frequenza prefissati Altri parametri del moto (intensità di Arias, ...) Intensità macrosismica	Deviazione standard dei modelli empirici predittivi
Livello 1	Tecniche approssimate di simulazione	Serie temporali "approssimate" (ovvero calcolate su sorgente puntiforme o estesa, per campo vicino e lontano, solo per fasi dirette, con limiti in alta o bassa frequenza,...)	Analisi statistica relativa alla distribuzione dei parametri derivati da famiglie di serie temporali simulate.
Livello 2	Tecniche di simulazione a larga banda a faglia estesa	Sismogrammi sintetici larga banda contenenti l'intero campo d'onda.	Analisi statistica relativa alla distribuzione dei parametri derivati da famiglie di sismogrammi sintetici simulate.

Tabella 2.1 Classificazione scenari adottata nel Progetto S3

Nell'ambito del Progetto S3 la variabilità del moto atteso per i livelli 1 e 2 è associata (i) alle dimensioni finite della sorgente e (ii) alla variabilità dei parametri cinematici che descrivono l'evoluzione del processo di rottura sulla faglia (posizione del punto di enucleazione, distribuzione di dislocazione finale, velocità di rottura, funzione sorgente). Allo scopo di controllare la variabilità del moto atteso, è necessario individuare gli intervalli di variazione dei parametri cinematici descrittivi il processo di rottura della sorgente.

Nelle aree di validazione, il confronto fra dati osservati e scenari a diverso livello di dettaglio permette di valutare l'accuratezza della predizione al crescere della complessità dei modelli, viceversa nelle aree di predizione lo scenario di livello 0 è utilizzato come indicatore dell'andamento medio rispetto al quale valutare la variabilità del moto atteso stimabile dai modelli più complessi.

Gli scenari al bedrock, calcolati a qualsiasi livello di complessità, permettono di valutare gli scenari al sito introducendo gli effetti della risposta locale, anch'essa stimata a diversi livelli di dettaglio in funzione delle caratteristiche del sito e dalla completezza delle informazioni disponibili per la sua caratterizzazione (si vedano *PS3-Deliverables D3-D4-D5*).

3. VARIABILITÀ DEGLI SCENARI

Il moto del terreno è caratterizzato da una variabilità intra-evento, ovvero per uno stesso evento il moto varia da sito a sito, e inter-evento, ovvero le caratteristiche del moto ad uno stesso sito variano in funzione del diverso terremoto che lo ha generato. In particolare, la variabilità spaziale e temporale del moto, a parità di magnitudo e distanza, dipende da: (i) modalità di rottura della sorgente; (ii) mezzo di propagazione a grande scala ed effetti di sito (geologia, topografia, non-linearità, ...); (iii) posizione dei ricevitori rispetto alla sorgente.

In questo capitolo discuteremo solamente la variabilità associata al processo di rottura sulla faglia, senza considerare gli effetti di sito e assumendo un modello di propagazione 1D noto (l'effetto del modello di propagazione deve essere possibilmente testato tramite il confronto con i dati reali). Per investigare la variabilità così definita è necessario utilizzare le simulazioni numeriche, perché i dati sperimentali esistenti non sono sufficienti per poter quantificare l'influenza dei parametri di rottura sul *ground-motion*. I modelli empirici predittivi (MEP), ottenuti dalle regressioni di dati registrati a più siti e per più eventi, sono infatti funzione di pochi parametri (magnitudo, distanza, meccanismo focale, sito) e includono nella deviazione standard sia la variabilità intra- che inter- evento.

Di seguito sono indicate le linee guida per poter affrontare lo studio parametrico di scenario. Gli esempi utilizzati provengono da studi particolari realizzati nell'ambito del Progetto S3. Le conclusioni di tali studi non sono quindi generalizzabili e devono essere sempre verificate.

1. Scelta del metodo di simulazione

La scelta del metodo di simulazione dipende dalla grandezza che si vuole studiare: esistono tecniche *full-wave* per il calcolo di spostamento e velocità a basse frequenze ($f < 2-3\text{Hz}$), e tecniche semplificate per velocità e accelerazione ad alte frequenze ($f > 1\text{Hz}$).

ESEMPIO

In **Figura 3.1** sono confrontate le registrazioni reali e le serie temporali simulate con una tecnica *full-wave* (COMPSYN) e una tecnica approssimata (DSM). Queste due tecniche di simulazione, utilizzate nel Progetto S3, sono brevemente descritte in **Appendice 1**.

Il confronto mette in evidenza che entrambe le tecniche riescono a riprodurre qualitativamente il dato registrato, nei limiti delle basse frequenze ($< 5\text{Hz}$) per Compsyn e delle alte frequenze per DSM ($> 0.5\text{Hz}$). Il valore aggiunto delle tecniche *full-wave* è la simulazione dello spostamento statico ($f=0\text{ Hz}$), mentre le tecniche approssimate riproducono facilmente le alte frequenze e quindi le accelerazioni del moto.

Per maggiori dettagli si rimanda al *PS3-Deliverable D0*.

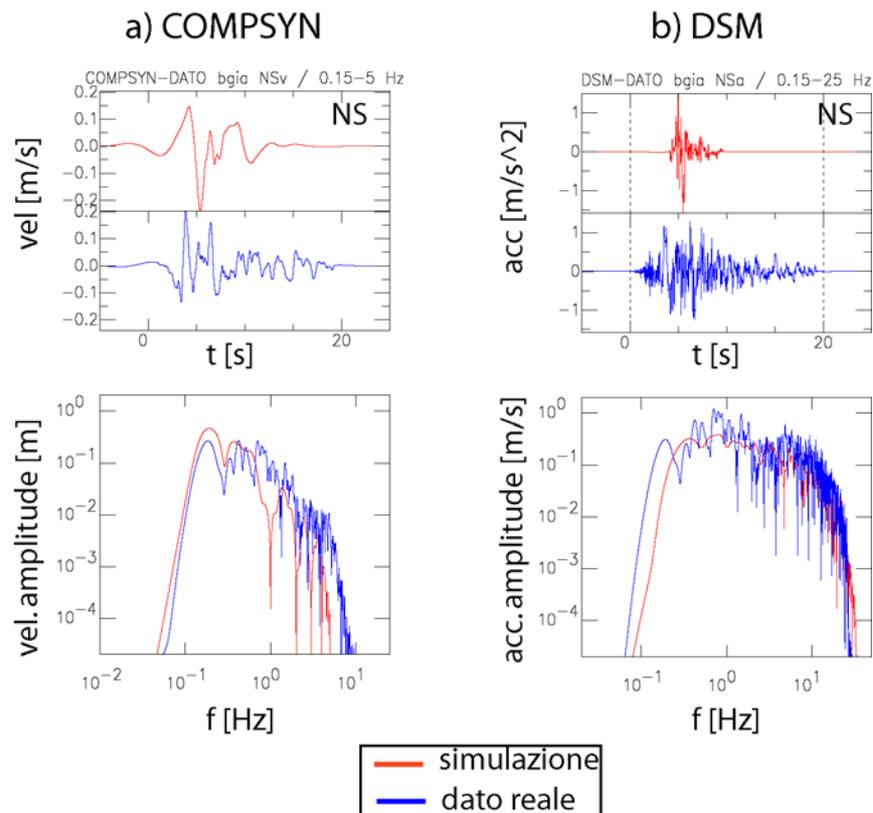


Figura 3.1. Confronto tra le registrazioni del terremoto dell'Irpinia 1980 alla stazione accelerometrica di Bagnoli e i sintetici simulati con (a) una tecnica full-wave (COMPSYN) e (b) una tecnica approssimata (DSM). Le serie temporali sono filtrate con un filtro passa alto, essendo 0.15 Hz il filtro strumentale; il filtro passa basso è controllato dalla frequenza limite delle simulazioni (5 Hz per Compsyn, 25 Hz per DSM). In alto sono riportate le serie temporali, in basso le trasformate di Fourier (si veda PS3-Deliverable D0).

2. Strategia

La simulazione di uno scenario dipende dall'obiettivo preposto, ovvero se si è interessati a riprodurre un evento avvenuto oppure se si vuole definire un modello predittivo. In entrambi i casi bisogna stabilire i parametri fisici del modello di rottura, la cui definizione dipende dal grado di conoscenza deterministica, più o meno accurata, che vogliamo/possiamo includere. Di seguito sono elencate tre possibili situazioni:

- a. tutti i parametri cinematici sono considerati noti, ad esempio da tecniche d'inversione per terremoti recenti di cui si dispongono le registrazioni (massimo grado di conoscenza);
- b. i parametri cinematici sono definiti tramite considerazioni fisiche (dalla dinamica) o geometriche, o dedotti dalle leggi di scala (massimo grado di ignoranza);
- c. alcuni parametri cinematici sono noti, altri indeterminati (grado di conoscenza condizionata dall'informazione a priori).

Per lo studio di scenario a fini predittivi (caso b) e c)) vengono generati tanti scenari in modo da campionare lo spazio di variabilità dei parametri cinematici di cui si ha uno scarso grado di conoscenza. In **Appendice 2** sono descritti i parametri cinematici comunemente utilizzati per la definizione del processo di rottura su un piano di faglia, e sono brevemente commentati i valori che possono assumere.

3. Influenza dei parametri cinematici

Ogni parametro cinematico contribuisce in modo diverso alle serie temporali del movimento del terreno, e di conseguenza ai valori dei parametri *ground motion* (PGA, PGV, PGD, ordinate spettrali, spostamento statico). La quantificazione dell'influenza del singolo parametro cinematico sulle stime del *ground motion* è strettamente legata alla geometria sito-sorgente e all'approccio utilizzato per valutarla (si veda **Appendice 2**).

ESEMPIO

In **Figura 3.2** è mostrato come le diverse scelte dei parametri (velocità di rottura, V_r , e posizione del punto di enucleazione, n_p) contribuiscano alla generazione dei valori di picco (PGA, PGV). Si noti che i parametri cinematici possono pesare in modo diverso sul moto simulato. Ad esempio, il punto di enucleazione controlla la distribuzione di PGA (i valori massimi si ottengono quando il punto di enucleazione è tale che il sito si trova in posizione direttiva, $n_p=1$), mentre vincola in minima parte la PGV; viceversa, la velocità di rottura controlla in ugual misura la distribuzione di PGA e PGV.

In **Appendice 3** viene descritto per esteso lo studio parametrico svolto nell'ambito del Progetto S3.

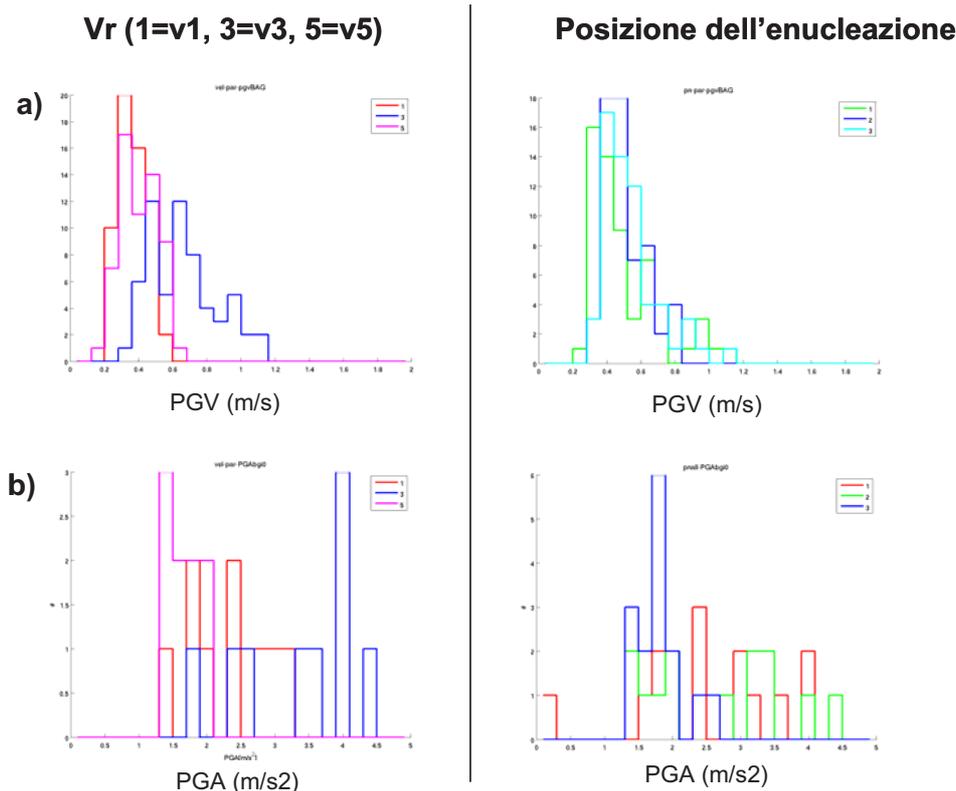


Figura 3.2 Distribuzioni del numero di scenari che contribuiscono alla (a) PGV (COMPSYN) e (b) PGA (DSM) simulati per la stazione di Bagnoli, distinguendo i contributi delle diverse scelte dei parametri (velocità di rottura, V_r , e posizione del punto di enucleazione, n_p). Sono state utilizzate due velocità di rottura costanti ($V_{r1}=0.7*V_s$ e $V_{r3}=0.9*V_s$, pari a 2.1 e 2.7 km/s) e una velocità V_r variabile proporzionalmente alla dislocazione sul piano di faglia (V_{r5} , con una velocità media di 2.1km/s). Per maggiori dettagli si rimanda all'Appendice 3.

4. Selezione dello scenario

Una volta generati gli scenari di scuotimento per uno stesso studio predittivo, si procede alla selezione di uno o più scenari in base alle richieste dell'utente ed alla distribuzione statistica dei risultati.

Gli scenari selezionati devono soddisfare dei requisiti predefiniti che dipendono dall'obiettivo di utilizzo. Un tipico esempio è la selezione in base al confronto con un valore di un qualsiasi parametro *ground-motion* considerato (quali PGA, PGV, ordinate spettrali). Tale valore può essere definito:

- a) tramite i modelli empirici predittivi (Sabetta e Pugliese, 1996; Ambraseys et al., 2005; Next Generation Attenuation of Ground Motions (NGA) Project, http://peer.berkeley.edu/products/nga_project.html) o tramite un'analisi probabilistica;
- b) a partire dai parametri della distribuzione dei valori generati dall'insieme degli scenari calcolati, quali la massima probabilità di occorrenza (valore modale), valori estremi, media e percentili.

ESEMPIO

In **Figura 3.3** viene mostrato un esempio di distribuzione di PGV per lo studio di scenario descritto in **Appendice 3**.

In questo caso esistono diversi scenari che generano valori simili, in particolare il numero di scenari che producono i valori massimi o con la massima probabilità di occorrenza corrispondono rispettivamente al 1% e 29% del totale (Figura 3a).

Tali scenari sono però caratterizzati da diversi valori dei parametri di rottura (Figura 3b).

Ad esempio i valori massimi di PGV sono prodotti dalla velocità di rottura maggiore V_{r3} e dal punto di enucleazione 1 (si veda Appendice 3), mentre i valori con la massima probabilità di occorrenza hanno contributi dalla velocità di rottura medio-bassa (V_{r1} e V_{r4}) e da diversi punti di enucleazione.

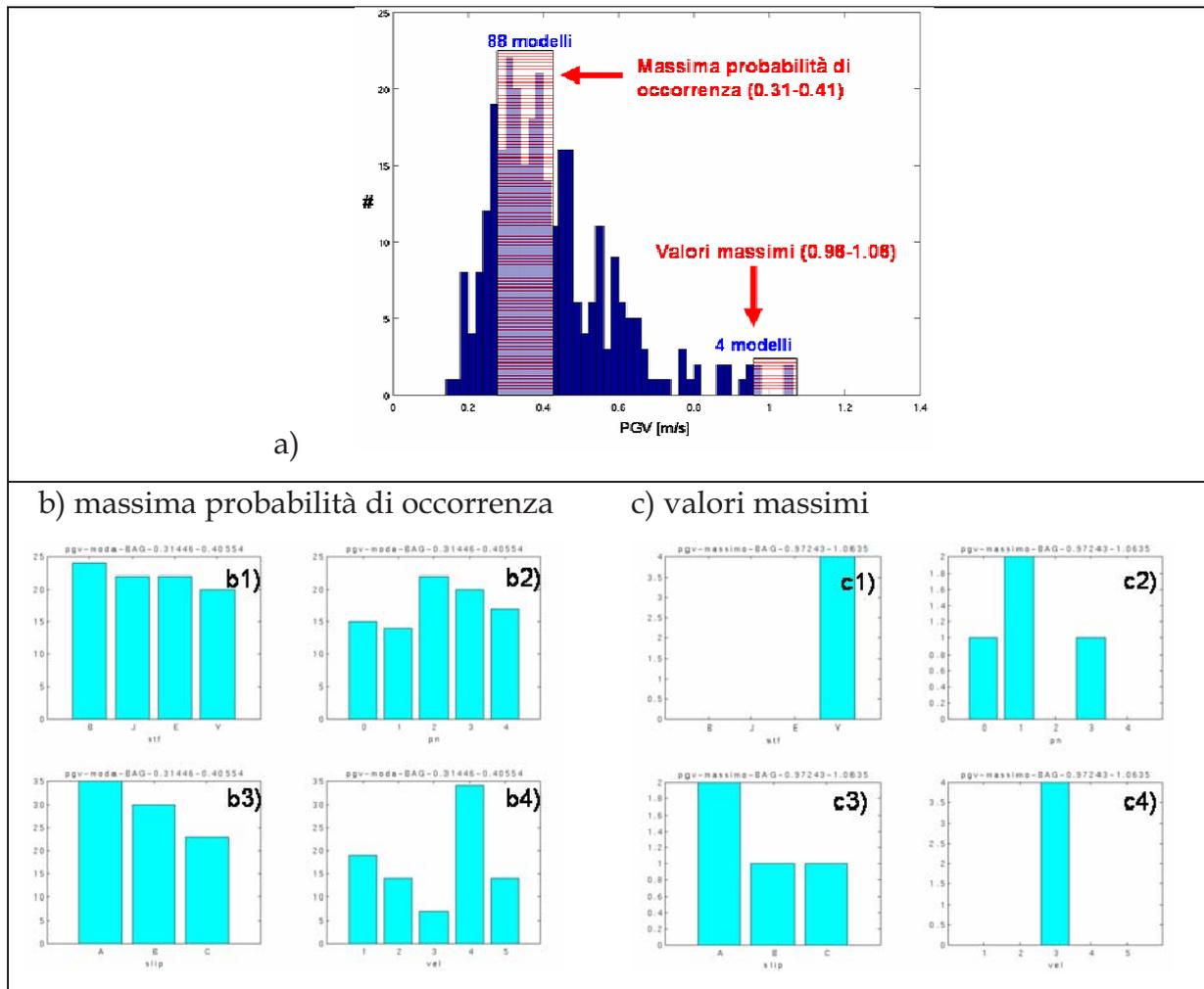


Figura 3.3 Distribuzioni del numero scenari in funzione della PGV prodotta a Bagnoli. In (a) sono evidenziati gli scenari che contribuiscono alla massima probabilità di occorrenza e ai valori massimi, mentre in b) e c) sono identificate le combinazioni di parametri cinematici che determinano tali valori: 1) funzione sorgente (B-Box, E-Esponenziale, J-Coseno, Y-Yoffe); 2) posizione punto di enucleazione; 3) distribuzione di slip; 4) velocità di rottura (Vr1, Vr2, Vr3, Vr4, Vr5).

5. Studio di pericolosità con più parametri d'interesse (pericolosità vettoriale)

I requisiti per la scelta dello scenario possono riguardare la corrispondenza con un definito valore (calcolato ad uno o più siti) di un solo parametro, oppure di più parametri contemporaneamente.

Si tenga conto che uno stesso valore di parametro *ground-motion* può essere generato da diversi scenari di rottura o, paradossalmente, da nessuno.

- 1) scenari *single-site*: scenari calcolati per un singolo sito. In questo caso non sempre esiste almeno uno scenario che soddisfa più richieste, ad esempio valori definiti per due parametri di picco.

ESEMPIO

In **Figura 3.4** sono mostrate le combinazioni di due parametri cinematici (distribuzione di slip e velocità di rottura) che contribuiscono al massimo valore di PGV e PGD al sito di Bagnoli, rispettivamente (0.96-1.06)m/s e (0.77-0.83)m. Si noti che gli scenari associati ad ogni combinazione dei due parametri possono avere diverse posizioni del punto di enucleazione e diverse funzioni sorgente. Nel caso in Figura solo 1% degli scenari produce il PGV massimo e il 2% il PGD massimo. Tali scenari sono caratterizzati dalla velocità di rottura massima (Vr3) e da diverse distribuzioni di slip. Tuttavia, non hanno le stesse funzioni sorgente e quindi non esistono modelli comuni che producono contemporaneamente massimi di PGV e PGD.

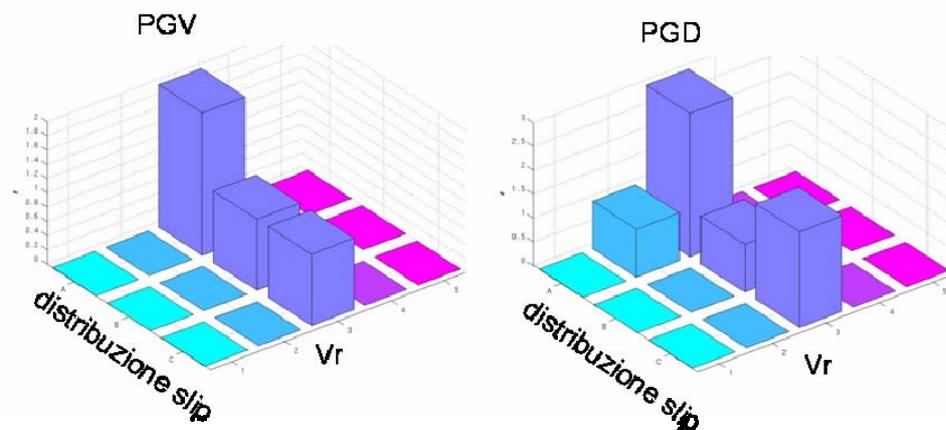


Figura 3.4: scenari che contribuiscono al valore massimo di PGV e PGD calcolata a Bagnoli. Gli istogrammi mettono in evidenza i contributi di due parametri cinematici: la distribuzione di slip (A, B e C) e la velocità di rottura (Vr1, Vr2, Vr3, Vr4, Vr5).

- 2) scenari *multiple-sites*: scenari generati da una faglia e calcolati per molti siti (zona estesa, area urbana). La distribuzione dei parametri *ground motion* a siti ad uguale distanza dalla faglia può essere molto variabile. Non è sempre immediato selezionare uno scenario che riproduca valori di un parametro definiti a più siti contemporaneamente.

ESEMPIO

In Figura 3.5 viene mostrata la distribuzione dei valori di PGV ai due siti BAG e ST02 che si trovano in posizioni diverse rispetto alla faglia, ma hanno uguale distanza da essa ($R_{\text{fault}}=8\text{km}$; si veda **Appendice 3**). Se selezioniamo per i due siti gli scenari che producono il valore di picco intorno a $\text{PGV}=0.34\text{ m/s}$ previsto da Sabetta e Pugliese (1996), si ottiene che solo il 2% degli scenari comuni ai due siti soddisfano lo stesso criterio. Le combinazioni di parametri cinematici che concorrono agli scenari comuni sono indicate nella seguente tabella:

scenario	funzione sorgente	punto di enucleazione	distribuzione di slip	velocità di rottura (V_r)
1	Coseno	1	C	4
2	Box	0	C	3
3	Coseno	0	B	4
4	Esponenziale	0	B	4
5	Yoffe	0	B	4

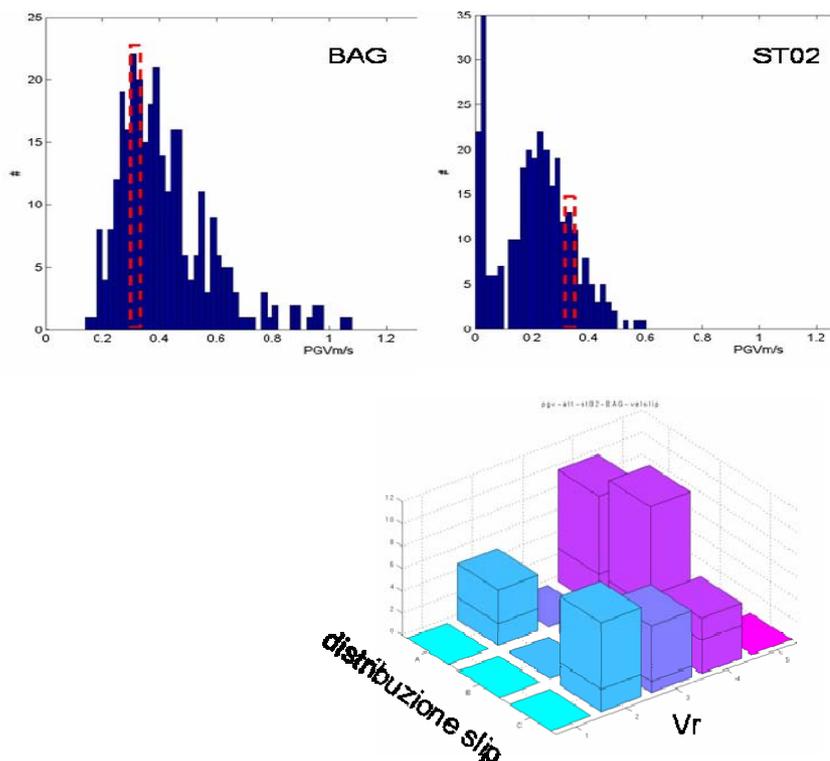


Figura 3.5 (a) Istogrammi dei valori di picco (PGV) calcolati a due siti BAG e ST02 ad uguale distanza dalla faglia ($R_{\text{fault}}=8\text{km}$). La linea tratteggiata indica l'intervallo (0.31-0.38)m/s intorno al valore previsto dalla Sabetta e Pugliese (1996); (b) insieme di scenari con stessa distribuzione di slip e stessa velocità di rottura che contribuiscono al valore di picco selezionato. Di questi, solo cinque hanno anche lo stesso punto di enucleazione e la stessa funzione sorgente.

- 3) scenari *multiple-faults*: scenari generati da molte faglie a uno o più siti. Lo studio di scenario utilizzando più faglie sismogenetiche comporta la definizione delle caratteristiche delle faglie che contribuiscono alla pericolosità del sito d'interesse. In questo caso aumentando il numero di variabili, ovvero di parametri di rottura variabili su più faglie, vengono maggiormente popolate le distribuzioni dei parametri *ground-motion* e allo stesso tempo si rende più complesso lo studio delle stesse.

ESEMPIO

Il capitolo 4.2 del presente Deliverable riassume i risultati dello studio di scenario effettuato per la città di Potenza (Basilicata) e descritto nel *PS3-Deliverable D17*. Le faglie sismogenetiche individuate nell'area di Potenza concorrono a diverso grado al moto del suolo simulato in città. La Figura 3.6 illustra come tale studio (livello

1) abbia permesso di individuare le tre faglie (F3, F6 e F8) che producono i valori maggiori di PGA al sito. Le tre faglie sono quindi state utilizzate per simulazioni più sofisticate di livello 1 (si veda *PS3-Deliverable D17* per maggiori dettagli).

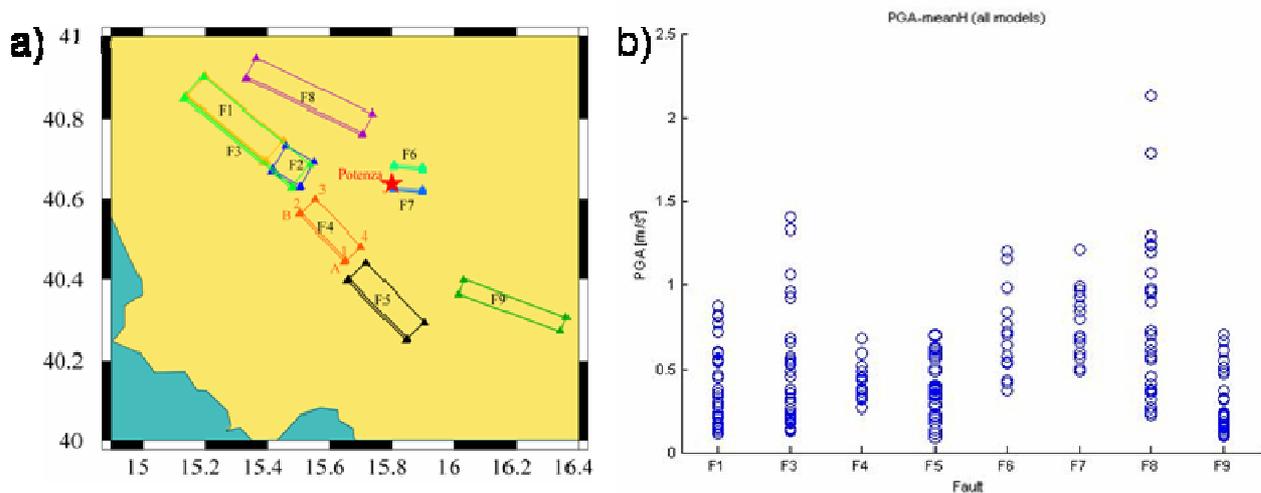


Figura 3.6. Risultati dello studio di scenario per la città di Potenza: a) posizione delle faglie sismogenetiche e della città di Potenza (Basilicata); b) valori di PGA simulati a Potenza variando i parametri cinematici su ognuna delle faglie considerate.

I requisiti per la scelta dello scenario possono riguardare la corrispondenza con un definito valore (calcolato ad uno o più siti) di un solo parametro, oppure di più parametri contemporaneamente.

Si tenga conto che uno stesso valore di parametro *ground-motion* può essere generato da diversi scenari di rottura o, paradossalmente, da nessuno.

6. Variabilità del moto

In generale gli scenari calcolati a livello 1 e 2 forniscono una variabilità del moto maggiore rispetto ai modelli empirici, strettamente dipendente dagli intervalli di variazione dei parametri cinematici utilizzati per costruire gli scenari. Tuttavia, vincolando alcuni parametri attraverso informazioni note, la variabilità spaziale del moto è dello stesso ordine di grandezza di quella ottenuta con i modelli empirici.

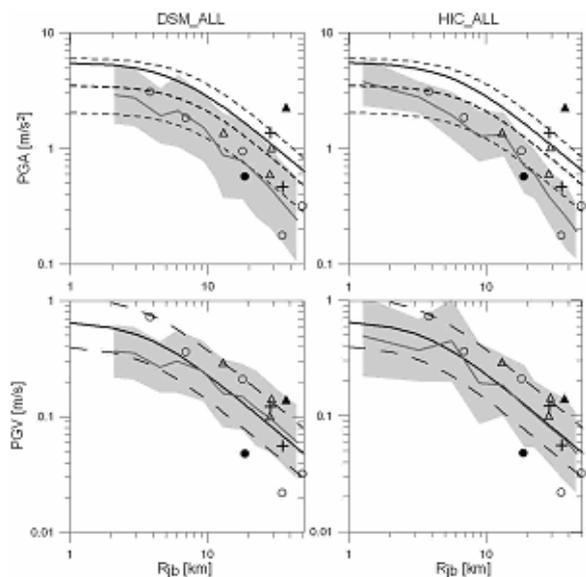


Figura 3.7. Scenario per il terremoto dell'Irpinia. Valori di PGA e PGV di livello 1 (DSM a sinistra) e 2 (HIC a destra) al variare della distanza.

La linea e l'area grigia rappresentano i valori medi e la deviazione standard di livello 1 e 2.

Le linee nere continue e tratteggiate rappresentano i valori previsti dai modelli empirici di Sabetta e Pugliese (1987) e di Ambraynes (2005). I vari simboli rappresentano i valori di picco osservati durante il terremoto dell'Irpinia del 1980 (M 6.9).

4. AREE DI STUDIO

In questo capitolo vengono riassunte le strategie adottate nel calcolo degli scenari degli scenari di scuotimento nelle quattro aree investigate in questo Progetto. Le aree prescelte si distinguono in aree di previsione: Gubbio e Potenza e in aree di validazione: Molise e Garda.

Nelle aree di previsione lo scopo è la realizzazione di scenari di scuotimento per i terremoti di riferimento individuati, che corrispondono agli eventi massimi che possono verificarsi, viceversa nelle aree di validazione lo scopo è verificare le capacità predittive delle tecniche di simulazione più o meno sofisticate adottate nel progetto in relazione anche delle conoscenze disponibili.

Per tutte le aree sono gli scenari sono stati calcolati a vari livelli di complessità, mettendo in evidenza l'importanza di utilizzare e confrontare più approcci al fine di giungere a stime del moto sismico realistiche.

4.1 GUBBIO

Gli scenari di scuotimento realizzati per la Città e il bacino di Gubbio (PG) hanno permesso di applicare le strategie delineate nel presente Deliverable e sono stati utilizzati come input per la stima degli effetti di sito. In particolare, è stato affrontato uno studio di scenario del tipo *multiple-sites*, ovvero tenendo conto di scenari generati da 2 faglie a più siti e, successivamente, applicando le possibili strategie per la selezione dello scenario rappresentativo. Si rimanda al *PS3-Deliverable D20* per maggiori dettagli.

Poiché lo scopo di questo studio è la stima del moto in molti punti in modo da ben campionare il bacino e poter successivamente valutare la variabilità, estremamente complessa, della risposta sismica della valle, lo scuotimento al bedrock è stato valutato a livello 0 e a livello 1.

Solo in alcuni siti campione il moto è stato calcolato con tecniche full-wave, al fine di verificare il grado di approssimazione introdotto dai livelli 0 e 1. A Gubbio lo scuotimento è stato pertanto espresso in termini di picchi del moto (PGA e PGV e ordinate spettrali in accelerazione) e sismogrammi sintetici rappresentativi della fase strong motion (vedi *PS3-Deliverable D0*).

Prima di procedere al calcolo degli scenari predittivi, si è proceduto alla simulazione del terremoto di Gubbio del 1984 (M 5.7), avvenuto su una porzione di una delle faglie selezionate per il calcolo del terremoto di riferimento.

4.1.1 Calibrazione

Il terremoto di Gubbio del 1984 (M 5.7) è avvenuto su una porzione di faglia della sorgente ITGG037, individuata per il calcolo degli scenari predittivi. Durante tale evento sono stati registrati 5 accelerogrammi di cui uno, GBB, molto vicino alla città di Gubbio. La modellazione di questo evento ha permesso di evidenziare le capacità di simulazione delle tecniche adottate in questo progetto, HIC e DSM, e di verificare l'adeguatezza dei modelli di faglia e del mezzo di propagazione, successivamente

utilizzati per il calcolo degli scenari.

Attraverso una tecnica di grid search, applicata ai dati e sismogrammi sintetici filtrati in bande di frequenza ristrette (1-4Hz) in modo da minimizzare gli effetti di sito, è stato possibile individuare i parametri cinematici del modello di sorgente, che meglio descrivono i dati osservati.

Per entrambe le tecniche di simulazione il miglior modello è descritto da una rottura quasi unilaterale in direzione N-O che si propaga con alta velocità ($v_r=0.9v_s$).

In Figura 4.1 i risultati ottenuti dallo studio dei residui calcolati tra dati osservati e simulati calcolati con le diverse tecniche. I residui sono espressi in termini di ordinate spettrali calcolate a diversi periodi. I cerchi neri rappresentano le simulazioni con DSM (scenari a livello 1), con HIC (scenari a livello 2) e la linea i risultati del modello empirico di Ambraseys et al., 2005. I risultati sono simili fra i modelli con le eccezioni delle stazioni che risentono degli effetti di direttività, NCR e PTL, dove i sismogrammi sintetici a faglia estesa hanno valori più vicini a quelli osservati.

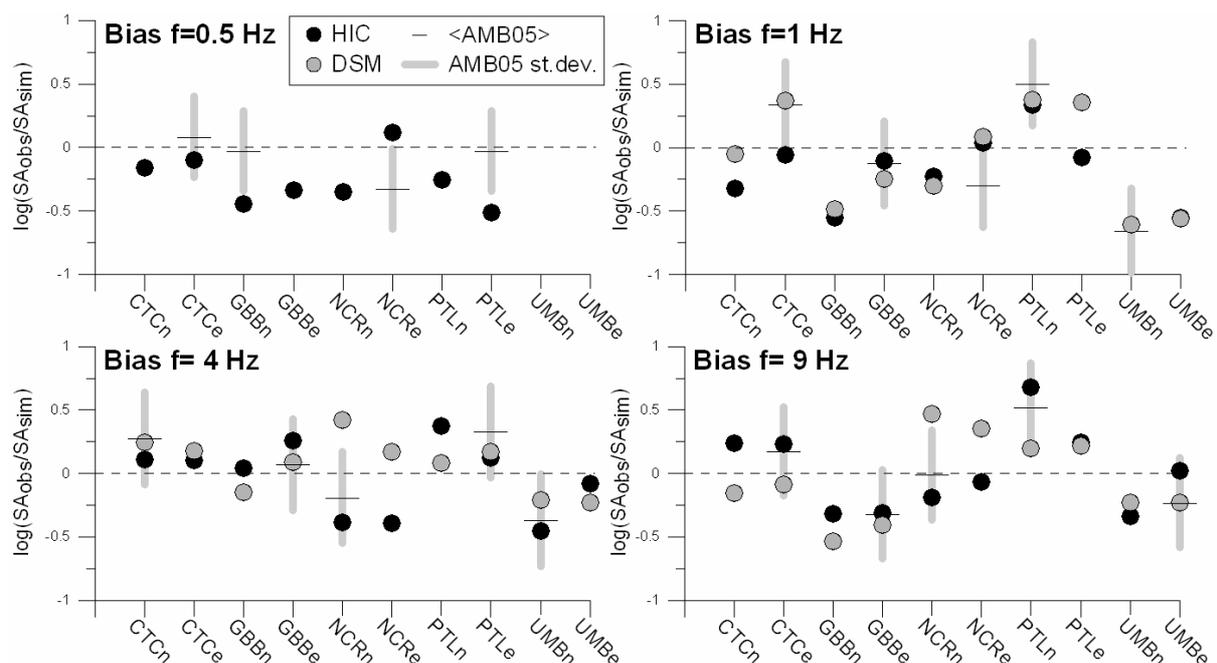


Figura 4.1 - Errore fra ordinate spettrali simulate e osservate. I cerchi neri e grigi si riferiscono alle simulazioni con HIC e DSM rispettivamente. Le linee grigie si riferiscono ai risultati applicando il MEP di Ambraseys et al., 2005. Il tratto orizzontale rappresenta la media, mentre quello verticale la deviazione standard.

In Figura 4.2 si mostra il residuo mediato sulle 5 stazioni al variare della frequenza, ottenuti con le due tecniche di simulazione. In generale entrambe le tecniche forniscono risultati consistenti fra loro e con le osservazioni e sono in grado di riprodurre abbastanza bene le caratteristiche spettrali del terremoto del 1984.

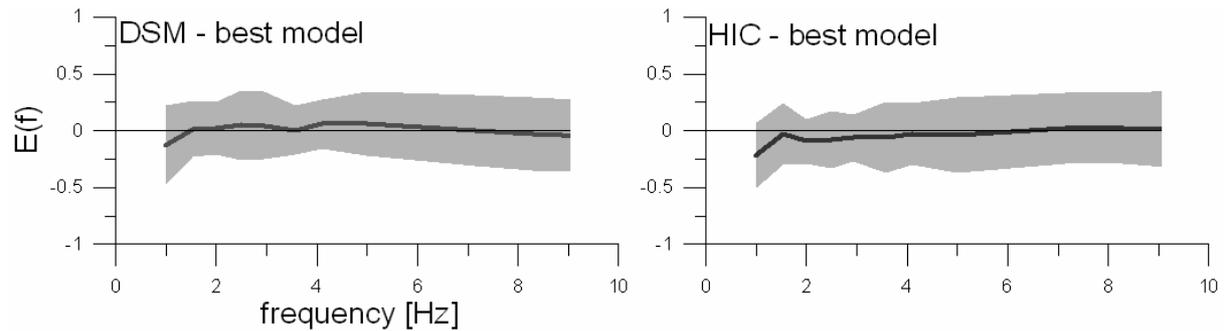


Figura 4.2 - Andamento del residuo $E(f)$ in funzione delle frequenze mediato su 5 station. La linea nera rappresenta la media dei residui mentre l'area grigia la deviazione standard.

I risultati ottenuti da questo studio indicano anche l'adeguatezza dei modelli di faglia e del mezzo di propagazione da adottare nel calcolo degli scenari predittivi e che le tecniche utilizzate per il calcolo dei sismogrammi sintetici HIC e DSM forniscono valori del moto ragionevoli e sono in grado di riprodurre alcune caratteristiche tipiche del moto del suolo in campo vicino.

4.1.2 Scenari di livello 0 e 1

Nell'area di Gubbio sono state individuate 2 strutture sismogenetiche (Figura 4.1) potenzialmente pericolose, i cui vincoli geometrici sono stati estratti dal DISS v.3.02 (DISS Working Group, 2006; Basili et al., 2007) e localizzate a circa 10 km dalla zona di interesse.

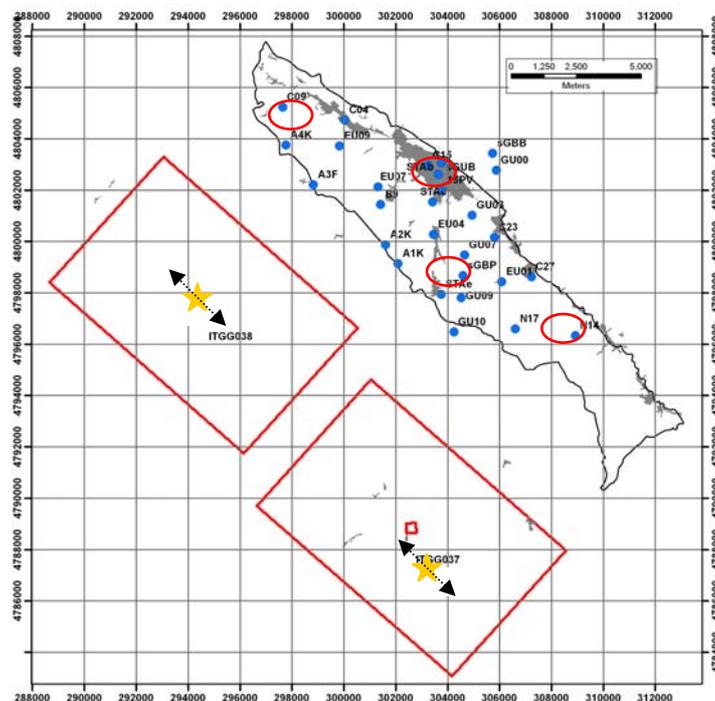


Fig 4.3 -Modelli di sorgente e posizione dei siti simulate nello studio di scenario. I cerchi rossi indicano i 4 siti utilizzati per la selezione dello scenario rappresentativo dello scuotimento a Gubbio. Le stelle indicano i punti di enucleazione degli scenari di rottura che generano un livello di scuotimento medio.

La magnitudo massima attesa per queste faglie è pari a 6 ed avendo geometrie e meccanismi focali simili, le principali differenze nel moto che possono generare a Gubbio e nel bacino dipendono unicamente dalle geometrie sito-sorgente.

Per il calcolo degli scenari predittivi nell'area di Gubbio si è adottata la seguente strategia:

1. Selezione di 4 siti, rappresentativi della bacino e della città di Gubbio.
2. Generazione a questi siti di circa 16000 sismogrammi con la tecnica DSM, ottenuti variando i parametri cinematici descriventi la rottura sulle faglie ITG037 e ITG038 e corrispondenti agli **scenari di livello 1**

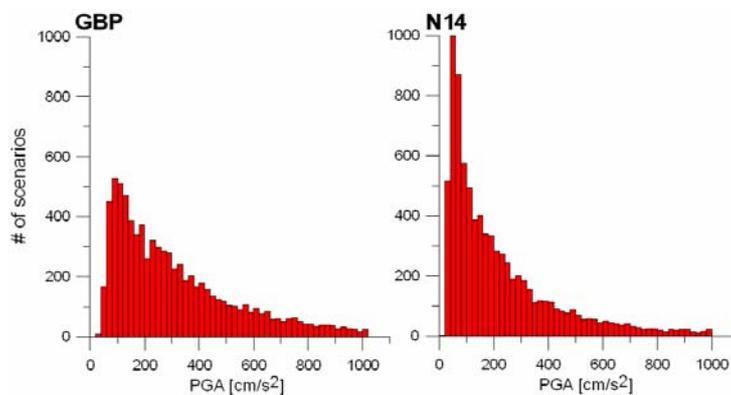


Figura 4.1.3 – Scenari di scuotimento a livello 1 per la faglia ITG038. Distribuzione dei picchi di accelerazione ai siti GBP e N14 ottenuti simulando 8200 diversi scenari di rottura. L'asse Y rappresenta il numero di scenari per ogni intervallo di PGA.

3. Individuazione della combinazione di parametri cinematici che forniscono i valori medi del moto e confronto i valori ottenuti dagli scenari a **livello 0**.

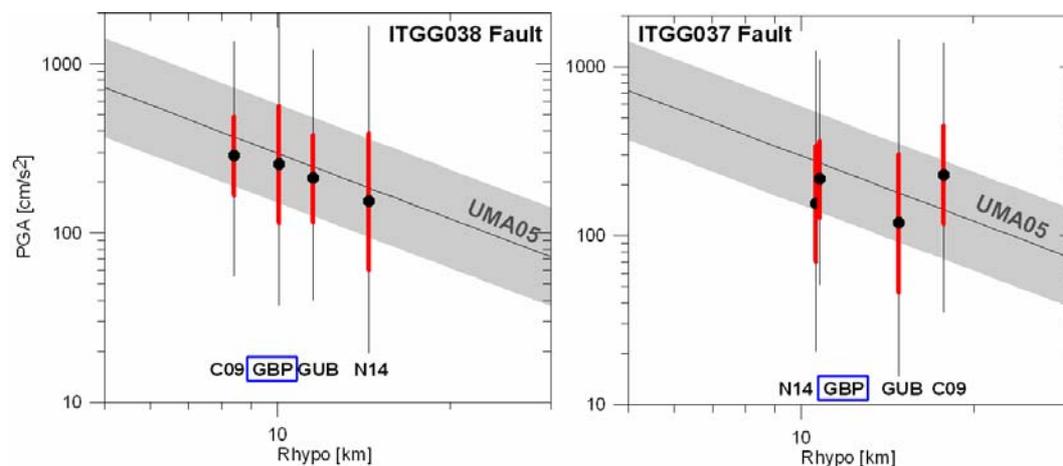


Figura 4.1.3 – Scenari di scuotimento a livello 1 e livello 0 per ITG038 e ITG037 calcolati ai 4 siti test. I cerchi neri indicano il valor medio delle distribuzioni simulate con DSM, la barra rossa la deviazione standard e la barra nera l'intero intervallo di variazione. La linea nera e l'area grigia indicano i valori ottenuti con il MEP di Bindi et al.; 2005.

4. Verifica che lo scenario medio non generi significative ampiezze del moto, legate a fenomeni di bassa frequenza, quali spostamento permanente e impulsi di lungo periodo dovuti alla direttività, attraverso il calcolo di sismogrammi sintetici a **livello 2**.

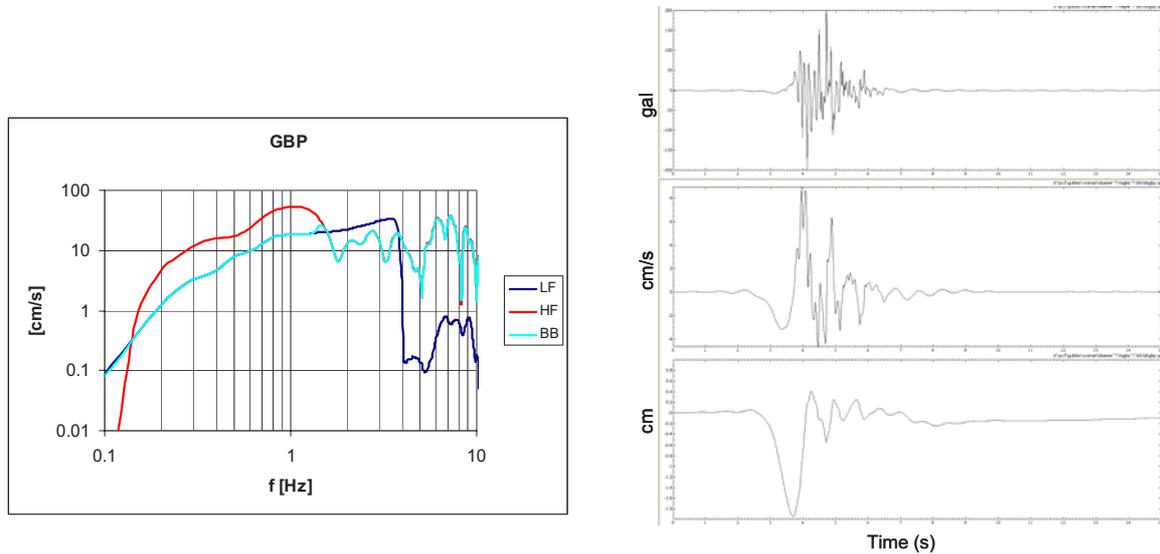


Figura 4.1.4 – Sismogrammi sintetici di livello 2 per ITG038 calcolati a GBP. A destra gli spettri di Fourier del segnale DSM (HF, in rosso) del segnale a bassa frequenza calcolato con una tecnica completa fino a 2 Hz (LH, in blu) e del segnale a larga banda ottenuto dalla combinazione dei 2 nell’intervallo di frequenza 1.3 - 1.5 Hz. A sinistra Accelerazione, velocità e spostamento del segnale a larga banda.

5. Calcolo degli scenari predittivi al bedrock nell’intera area di Gubbio a **livello 1**, da utilizzarsi per le successive analisi di sito e confronto con la normativa italiana.

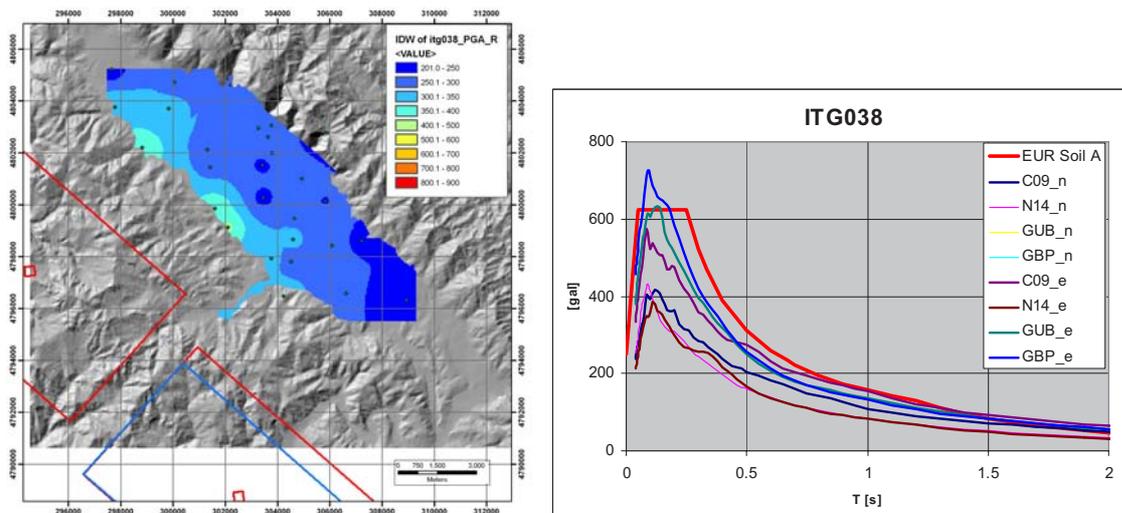


Figura 4.1.4 – A sinistra Scenari di scuotimento al bedrock di livello 0 nella piana e nella città di Gubbio per la faglia ITG038. Confronto fra gli spettri di accelerazione calcolati nei 4 siti test per lo scenario di rottura medio e lo spettro di normativa italiana per suoli rigidi scalato a 0.25g.

4.2 POTENZA

Gli scenari di scuotimento realizzati per la città di Potenza (Basilicata) hanno permesso di applicare le strategie delineate nel presente Deliverable e sono stati utilizzati per il calcolo degli scenari di danno da parte di UR6-UniBas. In particolare, è stato affrontato uno studio di scenario del tipo *multiple-faults*, ovvero tenendo conto di scenari generati da molte faglie a un solo sito. Si rimanda al *PS3 - Deliverable D17* per maggiori dettagli.

Nell'area intorno a Potenza sono state individuate diverse sorgenti potenzialmente pericolose per il sito in studio (DISS, progetto S2). L'utilizzo di una tecnica di simulazione semplificata di livello 1 (DSM, Pacor et al. 2005; *PS3-Deliverable D0*) ha consentito la selezione preliminare delle sorgenti a più alta pericolosità, su cui simulare poi il moto del suolo con una tecnica *broad-band* in campo completo di livello 2 (HIC, Gallovic and Brokeshova 2007; *PS3 - Deliverable D2*). L'uso di una tecnica *broad-band* consente di ottenere informazioni affidabili sia su parametri del moto del suolo in bassa frequenza (PGV) che su parametri ingegneristici legati alla durata (intensità di Arias), non sempre è ben riprodotta dalle tecniche in alta frequenza.

Le simulazioni ottenute costituiscono una popolazione di sismogrammi da cui selezionare le serie temporali d'interesse in funzione dell'utilizzo per gli scenari di danno.

4.2.1 Definizione delle sorgenti sismogenetiche e scenari di livello 1

Sono state individuate le faglie sismogenetiche nell'area di Potenza e utilizzati i vincoli geometrici e di massima magnitudo forniti dal progetto S2 (Figura 4.2-1 e in Tabella 4.2-1). Si noti che nelle successive simulazioni, nessuna variabilità è stata introdotta nelle geometrie delle faglie. Per fare questo, i parametri geometrici che definiscono le strutture dovrebbero essere forniti con associata la loro incertezza.

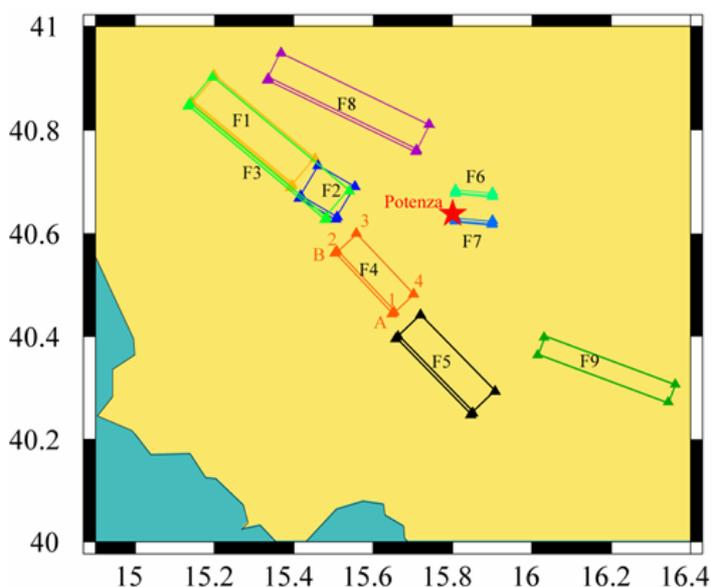


Figura 4.2-1. delle faglie utilizzate per simulare lo scuotimento atteso a Potenza

Tabella 4.2.1. Vincoli geometrici delle faglie

	F1	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Source Name	Colliano	Irpinia	Melandro-Pergola	Agri Valley	Potenza	Potenza	Andretta-Filano	Scorciabuoi
Strike (deg)	310	310	317	316	95	95	296	110
Dip (deg)	60	60	60	60	88	88	70	75
Rake (deg)	270	270	270	270	175	175	230	270
Length (km)	28	38	17.9	23	7.9	7.9	35	30
Width (km)	15	15	11.3	13.5	6.2	6.2	18	16
Depth Min (km)	1	1	1	1	14.8	14.8	1	1
Slip (m)	1.82	1.10	0.63	0.81	0.29	0.29	1.30	0.87
Mw (KA)	6.8	6.9	6.3	6.5	5.7	5.7	6.9	6.7
M0 (Nm)	2.29E+19	2.60E+19	3.80E+18	7.58E+18	4.20E+17	4.20E+17	2.46E+19	1.26E+19
R fault (km)	31.9	22.8	19.2	22.8	4.9	1.2	15.9	32.9

Per ogni faglia sono stati utilizzati 15-30 diversi modelli di rottura per DSM e 96-360 per HIC, ottenuti variando la velocità di rottura sulla faglia, la distribuzione finale di dislocazione e i punti di enucleazione. Le distribuzioni dei valori di picco degli scenari DSM (Figura 4.2-2) hanno permesso di selezionare le tre strutture che possono produrre i valori massimi di scuotimento a Potenza, ovvero F3, F6 (o F7) e F8.

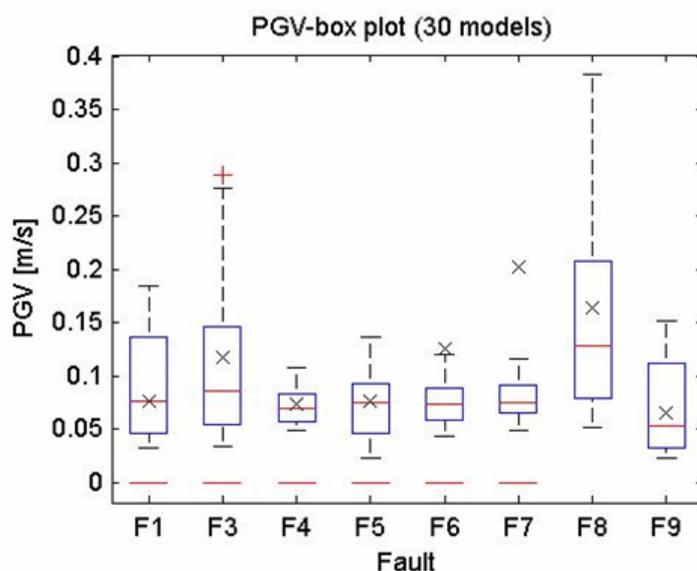


Figura 4.2-2. Grafico "box" dei valori di PGV simulati a Potenza per i 15-30 scenari di rottura per ogni faglia: il rettangolo delimita il 25% e 75% dei dati, la linea rossa nel mezzo indica la mediana della distribuzione, le linee tratteggiate identificano la variabilità totale. Le simulazioni sono confrontate con i valori dedotti dalla Sabetta e Puglese (1996) per uguale magnitudo e distanza dalla faglia (croci).

4.2.2 Scenari di livello 2

Una volta definite le sorgenti, è stato possibile simulare il moto del suolo con una tecnica in campo completo, *broad-band* (HIC). I diversi modelli di rottura permettono di ottenere un campionamento più o meno accurato dei possibili valori dei parametri cinematici della sorgente che possono interessare la faglia in esame. Se la popolazione campionata è consistente, è possibile effettuare una caratterizzazione statistica dei parametri *strong-motion* di interesse (Figura 4.2-3) e quindi selezionare famiglie di sismogrammi rappresentative di diversi valori della distribuzione. Nel caso in esame sono stati forniti a UR7-UniBas due set di 7 accelerogrammi selezionati come segue:

- 1) serie temporali (componenti orizzontali e verticale) la cui PGA assume rispettivamente i valori medio, mediano modale, 75-percentile, 84-percentile, minimo e massimo della distribuzione (Figura 4.2-4);
- 2) serie temporali (componenti orizzontali) la cui PGA assume valori in un intorno del valore mediano (Figura 4.2-5).

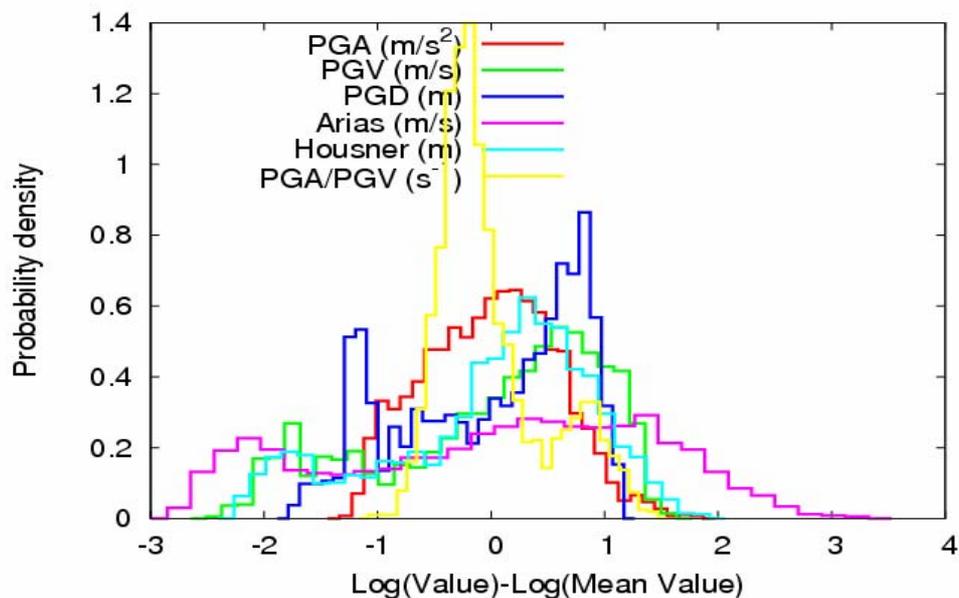


Figure 4.2-3. Densità di probabilità dei valori log-normali dei parametri ground-motion (PGA, PGV, PGA/PGV, PGD, Arias and Housner Intensity) calcolati per la faglia F3. L'integrale della distribuzione è normalizzato a 1.

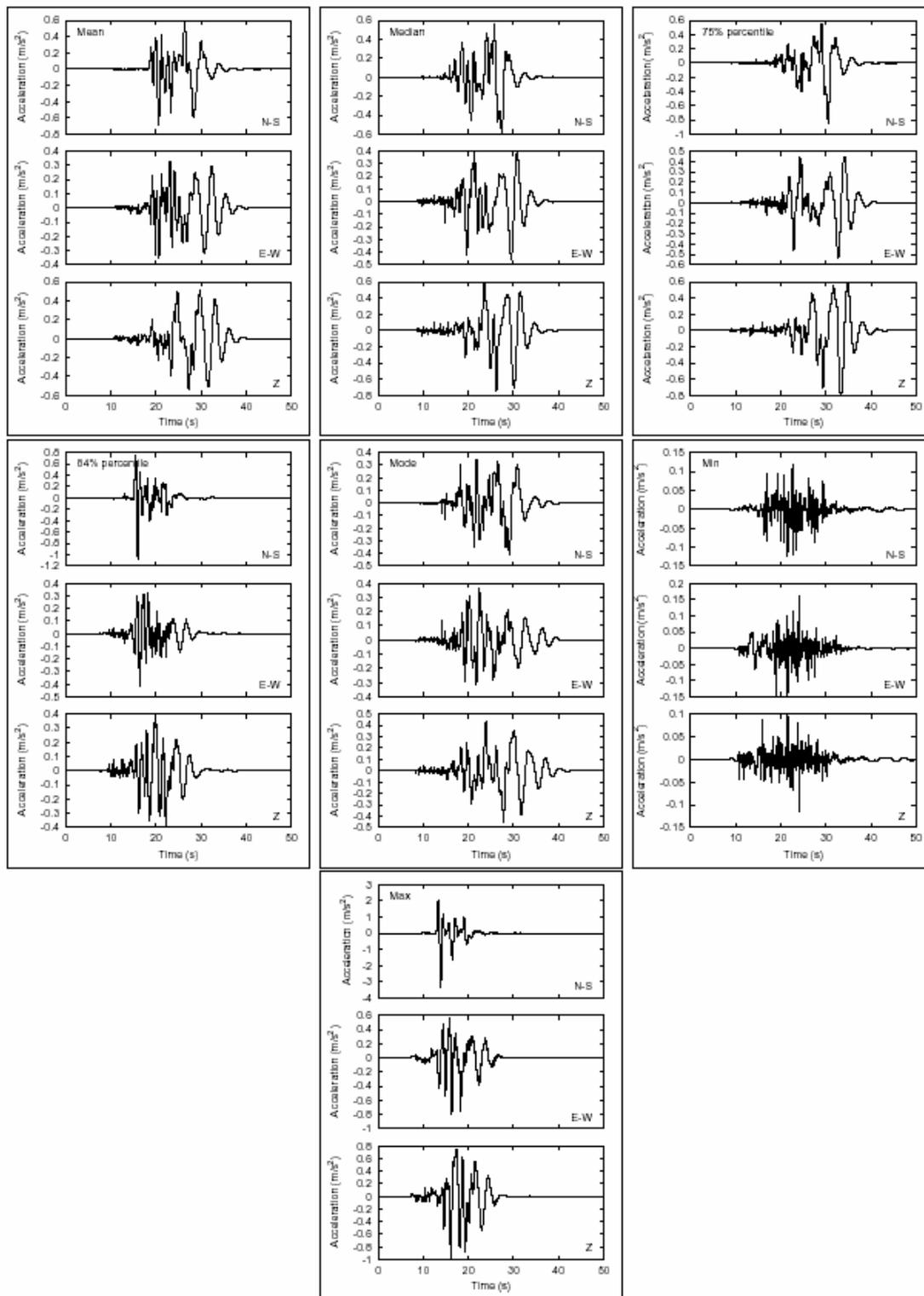


Figura 4.2.4. Accelerogrammi (componente NS, EW e verticale) per la faglia F3 e corrispondenti alla media, mediana, 75% percentile, 84% percentile, moda, minimo e massimo della distribuzione di PGA.

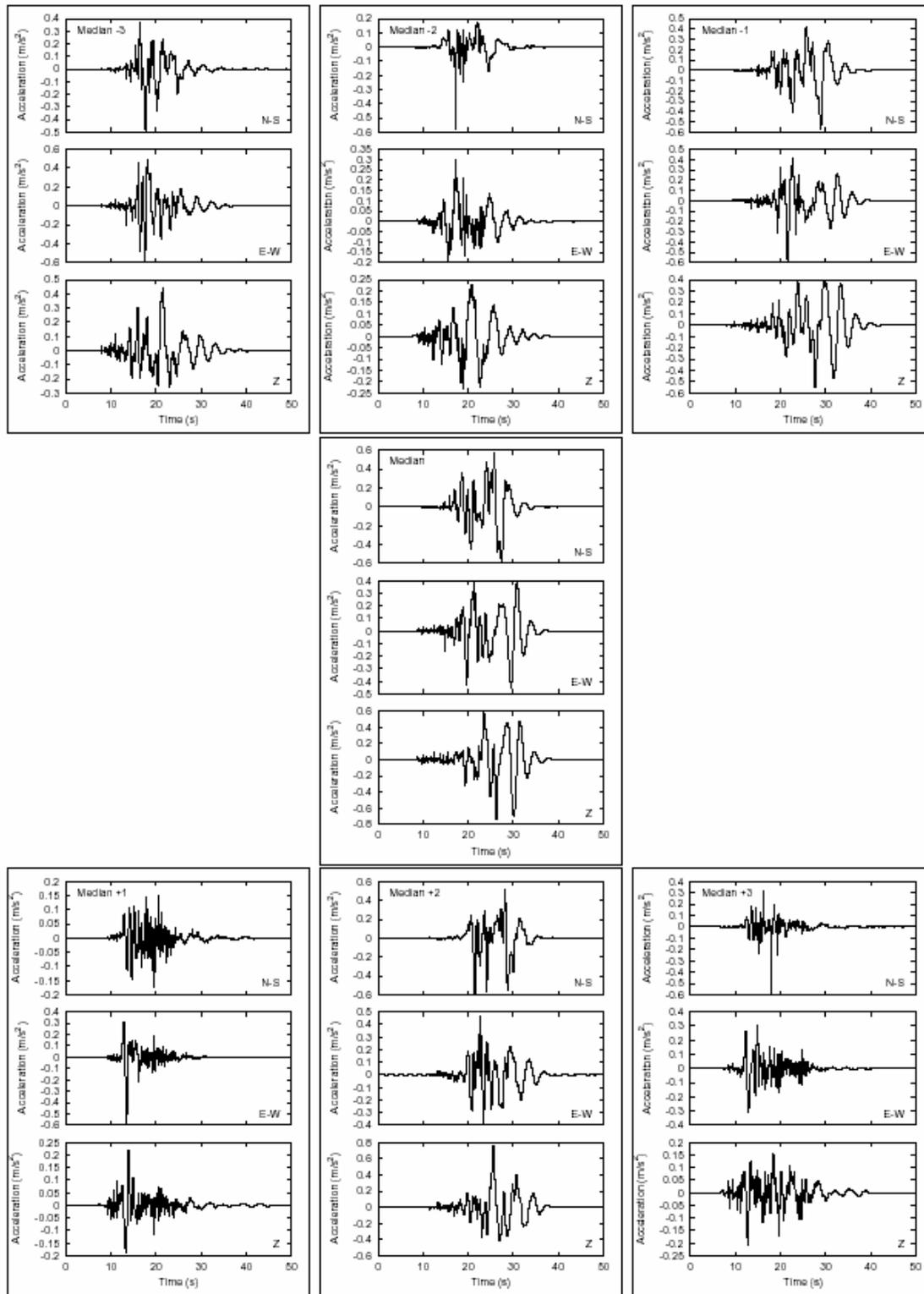


Figure 4.2.5 Accelerogrammi (componente EW) per la faglia F3 e corrispondenti a valori di PGA nell'intorno del valore mediano della distribuzione.

4.3 GARDA

I dati raccolti in occasione del recente terremoto del 24 Novembre 2004 ($M = 5.2$), hanno consentito di scegliere la zona del Garda come area di validazione di alcune metodologie adottate per la stima dello scuotimento. A tal fine sono stati utilizzati principalmente i dati di intensità I_{MCS} osservata (QUEST, 2005) e la registrazione accelerometrica ottenuta dalla stazione GVD della Rete Accelerometrica Nazionale, localizzata nel comune di Vallio Terme, e situata a 13.3 km dall'epicentro (SSN, 2005). La procedura di validazione ha permesso di verificare le capacità predittive delle metodologie impiegate per generare gli scenari di scuotimento ed ha consentito la definizione di un modello sismologico per l'evento del 2004. Le descrizioni dettagliate della procedura di validazione e degli scenari di scuotimento al bedrock che sono stati realizzati vengono presentate nel *PS3 - Deliverable 13*, che illustra anche le principali analisi condotte con le registrazioni weak motion ottenute durante la sequenza sismica.

Date le modeste dimensioni del terremoto e considerata la tipologia dei dati utilizzati per la validazione, sono stati realizzati scenari di scuotimento a due soli livelli di complessità: il livello 0, realizzato mediante l'impiego di diversi modelli empirici predittivi (in termini di intensità I_{MCS} , a_{MAX} e v_{MAX}) e il livello 1, ottenuto con l'impiego di una tecnica di simulazione asintotica da sorgente estesa. Nelle simulazioni sono stati adottati modelli cinematici semplificati della sorgente sismica (caratterizzati ad esempio da una distribuzione omogenea dello slip sulla faglia e da velocità di propagazione della rottura costante) e un modello spettrale di attenuazione ricavato dall'inversione di dati weak-motion registrati nell'area. Diverse leggi empiriche di conversione tra parametri *strong-motion* e intensità macrosismica sono state considerate per effettuare il confronto delle intensità sintetiche con la distribuzione di I_{MCS} osservata.

Trattandosi di un'area di validazione, gli aspetti legati alla predizione del moto e alla stima della variabilità sono stati considerati marginalmente, valutando solo l'influenza dei parametri caratterizzati da maggiore incertezza. In particolare, nella realizzazione degli scenari di livello 1, sono state mantenute fisse le dimensioni e la giacitura del piano di faglia mentre è stata introdotta una variabilità sulla profondità della sorgente e sulla posizione del punto di enucleazione.

4.3.1 Livello 0

Scenari di scuotimento calcolati direttamente in intensità.

Per generare scenari direttamente in intensità si è fatto uso dei seguenti modelli empirici predittivi per sorgente puntiforme:

FC06 (Faccioli e Cauzzi, 2006) recentemente sviluppata su una base di dati in area Mediterranea, con intensità registrate fino al grado $\geq VIII$;

Gr91 (Grandori et al., 1991) comunemente applicata a livello nazionale.

La Figura 4.3-1 mostra il campo di scuotimento in intensità generato attraverso GR91 e FC06, con sovrapposto il campo delle osservazioni macrosismiche.

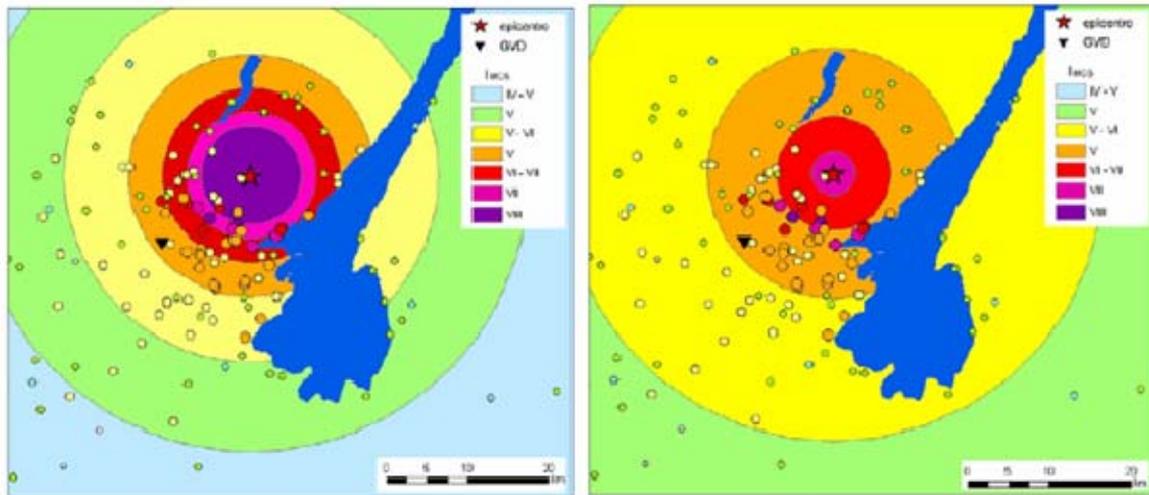


Figura 4.3.1 - scenari di intensità predetti con la relazione Gr91 (a sinistra) e FC06 (a destra), con i valori di intensità I_{MCS} osservati. In particolare vengono evidenziate le posizioni dell'epicentro e della stazione accelerometrica GVD.

Soprattutto nei primi 10 km dall'epicentro l'intensità osservata presenta una grande dispersione, con valori di I_{MCS} variabili tra V e VII-VIII.

In media, la relazione **Gr91** sottostima le intensità osservate di circa mezzo grado, mentre con **FC06** gli scarti fra intensità simulata e osservata hanno un valor medio quasi nullo entro i primi 25 km. In entrambi i casi si ottiene una deviazione standard pari a 0.6. A fini previsionali, le relazioni considerate forniscono indicazioni complementari: la **Gr91** è in grado di rappresentare meglio lo scenario in area epicentrale, e quindi di fornire una rappresentazione dei danni massimi attesi, mentre la **FC06**, presentando valori minimi degli scarti tra i valori predetti e quelli osservati, si presta meglio a descrivere il livello dei danni attesi a media distanza. Tuttavia, nonostante la moderata magnitudo dell'evento, la distribuzione anisotropa dell'intensità macrosismica osservata entro i primi 20 km dall'epicentro, suggerisce l'adozione di scenari di scuotimento caratterizzati da un maggiore livello di complessità.

Scenari di scuotimento in intensità dedotta da parametri di picco

Per generare scenari di scuotimento in termini di parametri di picco sono stati considerati 3 modelli empirici predittivi (MEP) in accelerazione a_{MAX} e velocità v_{MAX} : **Mss07** (Massa et al. 2007); **SP96** (Sabetta e Pugliese, 1996) e **Amb05** (Ambraseys et al., 2005). I valori di scuotimento così ottenuti sono stati poi convertiti in intensità mediante le relazioni empiriche di Margottini et al. (1992) (**Ma92**) e di Faccioli e Cauzzi (2006) (**FC06_** a_{MAX} e **FC06_** v_{MAX}). Combinando nei diversi modi possibili i MEP e le relazioni di conversione impiegate, si sono prodotti 12 scenari di scuotimento, per ciascuno dei quali sono state confrontate l'intensità predetta, I_{EST} e quella osservata, I_{MCS} (Figura 4.3-2). Come si vede, rispetto a **Ma92**, le relazioni di conversione **FC06_** a_{MAX} e **FC06_** v_{MAX} consentono di riprodurre in maniera più adeguata l'andamento delle intensità osservate con la distanza e, qualora si intendano adottare scelte a favore di sicurezza, si suggerisce l'adozione di **SP96** o

Amb05 come modello empirico predittivo per il parametro *strong-motion*. Tuttavia, anche in questo caso, l'utilizzo di scenari a sorgente puntiforme non permette una predizione adeguata delle intensità osservate nei primi 10 km.

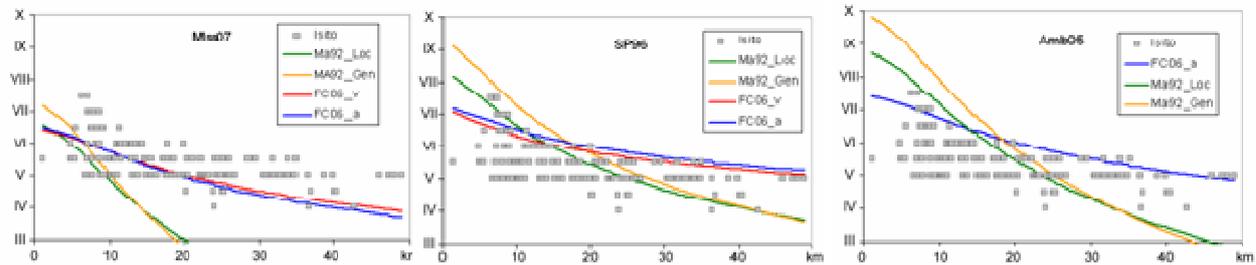


Figura 4.3-2 - Confronto tra le intensità osservate (I sito) e quelle calcolate attraverso la conversione dei valori di scuotimenti di picco stimati con Mss07, SP96 e Amb05.

4.3.2 Livello 1

Validazione del modello predittivo

Il terremoto del 24 Novembre 2004 è stato modellato mediante sorgente estesa allo scopo di riprodurre gli effetti di anisotropia osservati nel campo macrosismico.

A questo scopo, è stata impiegata la tecnica DSM (Pacor et al., 2005), che risulta particolarmente adatta a riprodurre gli effetti di direttività di alta frequenza. Le simulazioni sono state effettuate facendo variare diversi parametri cinematici e ipotizzando che l'evento del 2004, avvenuto su una porzione del sistema di faglie Giudicario, possa essere localizzato su una faglia inversa avente la stessa giacitura della sorgente sismogenetica dell'evento del 1901, per il quale il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani riporta $I_0 = VIII$ MCS (Gruppo di lavoro CPTI, 2004; DISS Working Group, 2006). Nel *PS3-Deliverable 13* viene descritta in dettaglio la procedura di validazione e vengono riportati gli intervalli di variazione adottati per i diversi parametri cinematici. Complessivamente, sono stati realizzati 54 scenari di scuotimento, successivamente trasformati in 162 scenari di intensità, utilizzando le relazioni empiriche Ma92, FC06 e Gr91. In Figura 4.3-3 viene mostrato il confronto fra intensità osservate, I_{OSS} , e le intensità sintetiche, I_{EST} , ottenute con i parametri cinematici che consentono di ottenere il minimo valore di RMS, calcolato su $(I_{EST} - I_{OSS})$.

Il confronto con il campo macrosismico, effettuato in termini di RMS dello scarto tra le intensità simulate e osservate, ha consentito di selezionare gli scenari da impiegare in una seconda fase di validazione, realizzata confrontando le ampiezze spettrali di accelerazione simulata e misurata alla stazione GVD. Un esempio relativo alla seconda fase di simulazione viene invece mostrato in Figura 4.3-4, per i casi che presentano il miglior fit con il dato accelerometrico.

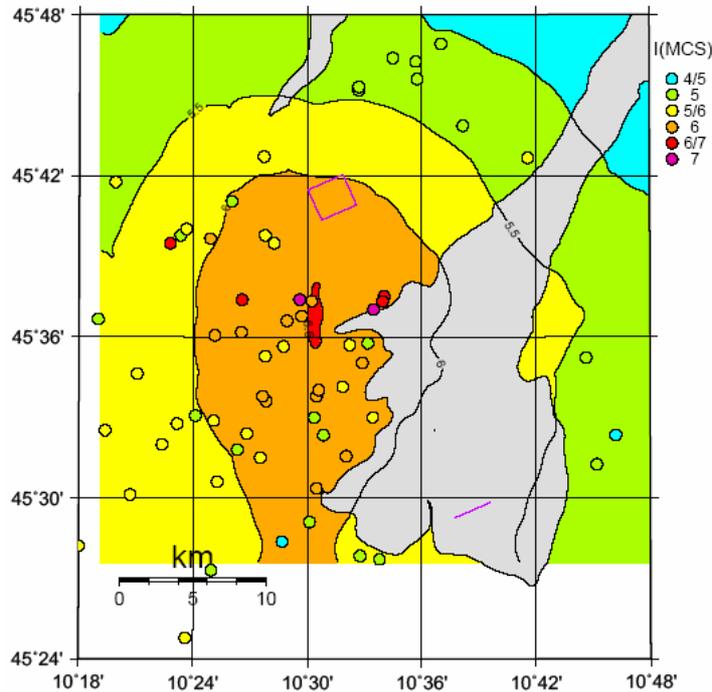


Figura 4.3-3 - Confronto fra le intensità osservate durante il terremoto di Salò del 2004, I_{OSS} , e le intensità sintetiche, I_{EST} , ottenute con i parametri cinematici che consentono di ottenere il minimo valore di RMS di $(I_{EST} - I_{OSS})$. Si ottiene in questo caso $RMS=0.25$. Il rettangolo colorato rappresenta la proiezione in superficie della sorgente sismogenetica ipotizzata.

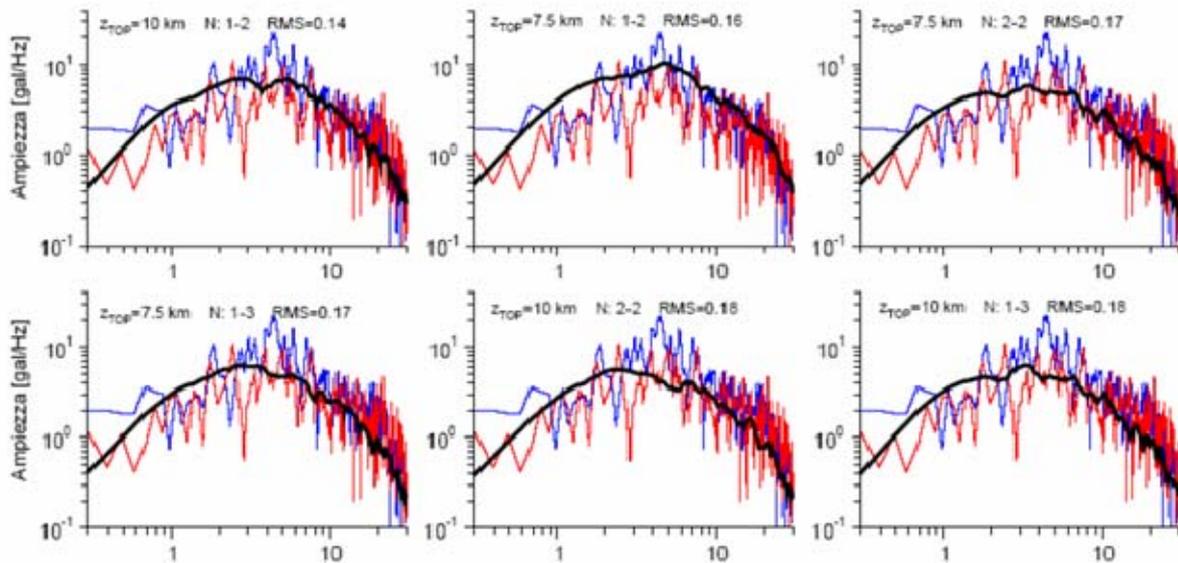


Figura 4.3-4 - Spettri di accelerazione simulati e osservati a GVD. Le due componenti orizzontali del moto registrato (linee sottili) vengono confrontate con le simulazioni ottenute con diversi valori di profondità della faglia e per diverse posizioni del punto di enucleazione. Il valore di RMS è stato calcolato sulla differenza dei logaritmi delle ampiezze spettrali osservate e simulate.

Le simulazioni effettuate mostrano che il campo di intensità macrosismica osservata risulta essere compatibile con gli effetti di faglia finita della sorgente sismogenetica ipotizzata. Il confronto areale con le intensità osservate e il confronto puntuale con l'accelerazione registrata a GVD, consente di definire i parametri ottimali per la riproduzione dello scuotimento del terremoto di Salò del 24 Novembre 2004. In particolare, risultano ben definite sia la velocità di propagazione della rottura ($V_r=2.1$ km/s) che la relazione di conversione fra parametro strong motion simulato e intensità macrosismica (**FC06_vMAX**). Meno vincolate risultano invece la profondità della faglia (variabile fra 5 e 10 km) e il punto di enucleazione, definito comunque con un'incertezza di circa 1 km, nella parte più profonda del piano di faglia, in direzione NNE rispetto al baricentro.

Scuotimento atteso

Gli scenari predittivi di livello 1 sono stati realizzati sulla base dei risultati ottenuti dalla procedura di validazione, che ha consentito di fissare la geometria di sorgente, la velocità di rottura e il modello spettrale di attenuazione. La profondità minima, z_{TOP} , non risulta essere sufficientemente vincolata dalle osservazioni, e per tale parametro sono stati impiegati 3 diversi valori: $z_{TOP} = 5.0; 7.5$ e 10 km. Infine, è stato assunto un grigliato di 15 punti di enucleazione omogeneamente distribuiti nella semimetà inferiore della faglia. A titolo di esempio, in Figura 4.3-5 viene mostrata la mappa di PGA corrispondente allo scenario di scuotimento medio, realizzato facendo variare la posizione del punto di enucleazione in tutta la semimetà inferiore della faglia e considerando $z_{TOP} = 7.5$ km. Si può notare che la variazione del punto di enucleazione limita gli effetti di direttività. Nonostante l'impossibilità di definire con maggiore precisione la posizione dell'ipocentro sul piano di faglia, le simulazioni realizzate in fase di predizione possono dunque sfruttare l'eventuale conoscenza della geometria di sorgente per stimare la posizione dell'area di massimo scuotimento atteso.

4.3.3 Confronto fra scenari a diverso livello di complessità

Gli scenari di scuotimento mostrati evidenziano che anche nel caso di sorgenti di media magnitudo, la forma del campo di scuotimento può differire dalle predizioni basate sull'ipotesi di sorgente puntiforme. A questo proposito, in Figura 4.3-6 vengono mostrati i campi di intensità media degli scenari di livello 0 e di livello I, ottenuti rispettivamente con la relazione **FC06** e con la simulazione da faglia estesa combinata con la legge di conversione **FC06_vMAX**. Nella medesima figura, gli scenari predittivi di entrambi i livelli vengono confrontati con il campo delle osservazioni macrosismiche. Come si vede, l'area di massimo risentimento prodotta dallo scenario di livello 1 rispecchia la geometria della faglia ipotizzata, contrariamente alla predizione di livello 0, che mostra invece una simmetria circolare e conseguentemente non riesce a riprodurre in modo adeguato gli effetti di anisotropia del campo macrosimico osservati a breve distanza. Naturalmente, lo scenario medio di livello I, che come si vede riesce parzialmente a tener conto di tali effetti e che è realizzabile prima del terremoto, presenta un peggior accordo con le

osservazioni rispetto allo scenario mostrato in Figura 4.3-3. Si noti tuttavia che, a causa della necessità di ipotizzare la posizione del punto di enucleazione sulla faglia, lo scenario di Figura 4.3-3 è realizzabile solo dopo l'evento

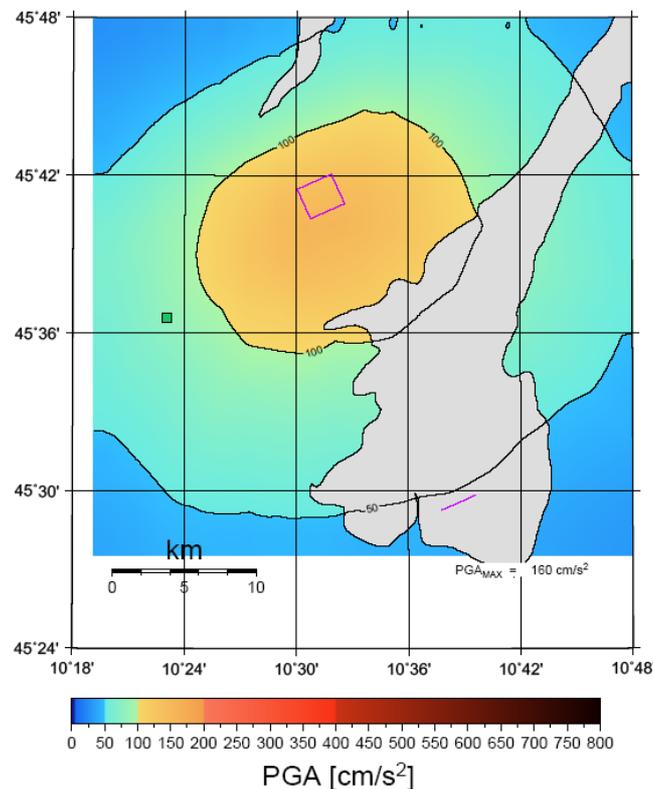


Figura 4.3-5 – Mappa di accelerazione di picco ottenuta mediante simulazione da sorgente estesa per lo scenario medio, ottenuto con profondità e velocità di rottura fissate e facendo variare il punto di nucleazione nella semimetà inferiore della faglia (rettangolo colorato).

Allo scopo di confrontare la variabilità predetta dagli scenari di livello 1 con le intensità osservate nel caso del terremoto del 2004, in Figura 4.3-7 vengono mostrati gli scenari di intensità minima e massima ottenuti con le simulazioni da sorgente estesa. Si noti che in generale, i valori di intensità osservata (che ovviamente dipendono dalla specifica enucleazione verificatasi durante il terremoto di Salò), risultano compresi nell'intervallo di variazione di intensità attesa (scenari di intensità minima e massima).

In definitiva, per soddisfare le esigenze della Protezione Civile, interessata alla generazione di scenari in fase di emergenza immediatamente disponibili a seguito di un terremoto, nel caso di eventi di magnitudo massima intorno a 5.5 e per distanze epicentrali maggiori di circa 10 km, le analisi effettuate suggeriscono l'utilizzo della relazione **FC06** per la realizzazione di scenari isotropi (di livello 0), calcolabili attraverso la sola conoscenza della localizzazione e della magnitudo dell'evento.

L'individuazione di eventuali sorgenti sismogenetiche, potrebbe invece essere sfruttata per la generazione di scenari di livello I, maggiormente rappresentativi

della distribuzione dello scuotimento in area epicentrale. Nel caso del terremoto di Salò del 2004, la possibilità di effettuare una buona calibrazione del modello sismologico, ha permesso di realizzare a posteriori previsioni affidabili dell'intensità risentita entro i primi 20-25 km di distanza dall'epicentro.

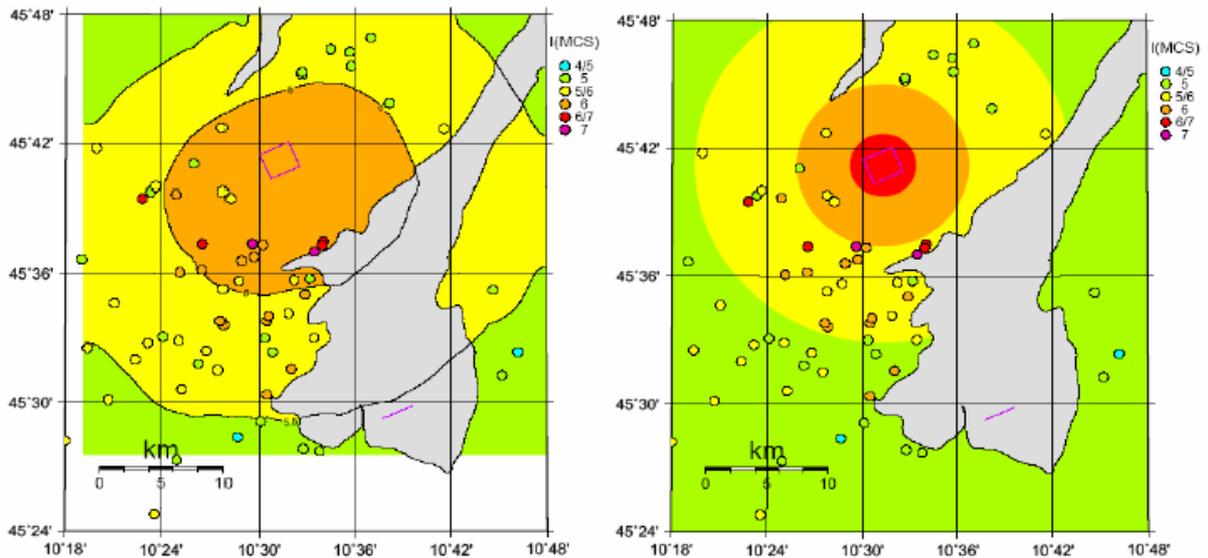


Figura 4.3-6 – Scenari medi di intensità attesa di livello 1 (a sinistra) e di livello 0 (a destra). Vengono riportate le intensità osservate durante il terremoto di Salò del 2004.

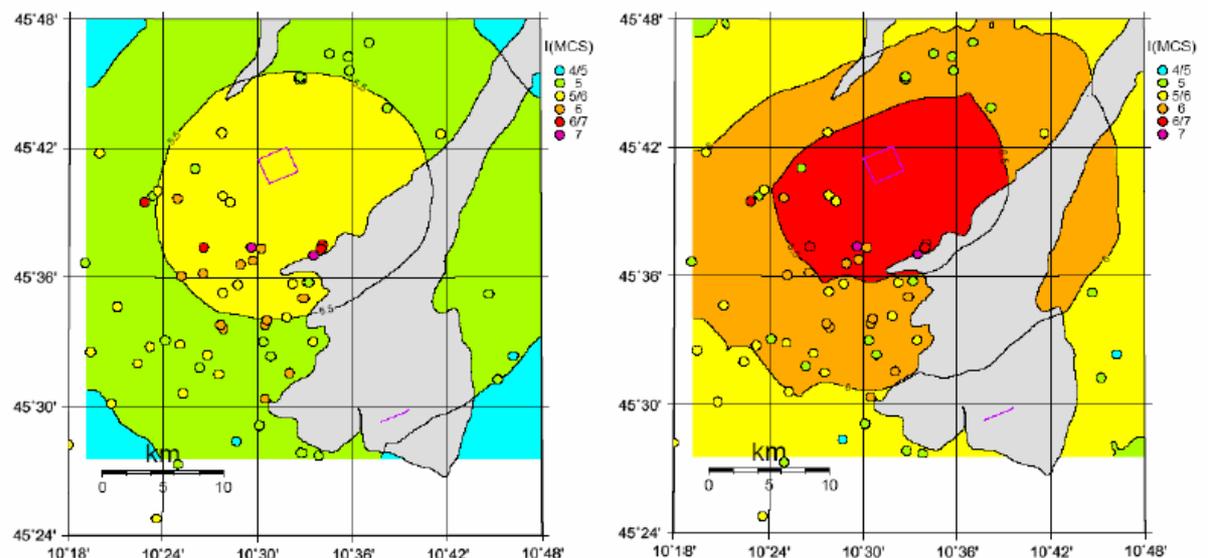


Figura 4.3-7 – Livello I: scenari minimo (a sinistra) e massimo (a destra) di intensità attesa. Vengono riportate le intensità osservate durante il terremoto di Salò del 2004.

4.4 MOLISE

I dati registrati durante sequenza sismica del 2002 hanno consentito di scegliere la zona molisana come area di validazione di diverse metodologie impiegate per la stima dello scuotimento. A tal fine sono stati utilizzati i dati accelerometrici registrati dalle stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale (DPC-USSN, 2004) e i dati weak motion raccolti durante il primo mese di attività sismica delle reti temporanee installate in area epicentrale da diversi enti (DPC, INGV, INOGS, UNIGE). I dati selezionati e le principali analisi effettuate sono contenuti nel *PS3-Deliverable D7*.

Gli accelerogrammi registrati dalle stazioni situate a distanze epicentrali < 60 km sono stati impiegati per vincolare la sorgente sismogenetica dell'evento del 31 Ottobre (10:32 UTC, Mw=5.8). Dati strong e weak motion sono stati invece utilizzati per stimare l'attenuazione. La procedura di validazione ha quindi permesso di verificare le capacità predittive delle diverse tecniche di simulazione impiegate e ha consentito la definizione di un modello sismologico per gli eventi principali della sequenza. Le descrizioni dettagliate della procedura di validazione e degli scenari di scuotimento al bedrock che sono stati realizzati vengono presentate nel *PS3-Deliverable D7*, che illustra anche le principali analisi condotte con le registrazioni strong e weak motion ottenute durante la sequenza sismica.

Nella realizzazione degli scenari per l'area molisana, il principale obiettivo era la definizione del moto sismico al bedrock da utilizzare per la modellazione degli effetti di sito in 5 comuni localizzati in area epicentrale (Bonefro -BNF, S.Giuliano -SGL, Colletorto - CLT, S.Croce di Magliano - SCM, Ripabottoni - RPB).

A tal fine si è impiegata una tecnica di simulazione broad-band capace di riprodurre il campo d'onda completo tra 0 e 10 Hz (scenario di livello II). Gli scenari a minore livello di complessità, generati mediante modelli empirici predittivi (scenari livello 0) oppure con metodi asintotici di simulazione da faglia estesa, maggiormente adatti a riprodurre il moto del suolo in alta frequenza (scenari di livello I), sono stati utilizzati per confrontare i risultati ottenuti con la simulazione broad-band (scenari di livello II).

4.4.1 Livello 0

Per la generazione degli scenari di livello 0 sono state impiegate alcune equazioni predittive disponibili per l'area in esame: una relazione locale ricavata mediante l'inversione delle forme d'onda registrate durante la sequenza molisana (L06; Luzi et al., 2006); la relazione di Sabetta e Pugliese (SP96; 1996), generalmente adottata a livello nazionale, e la relazione di Ambraseys (A95; 1995) ricavata con dati europei. Il principale vantaggio della A95 consiste nell'ampia base dati utilizzata per ricavarla (più di 1600 registrazioni da 865 terremoti), nel consistente numero di eventi profondi presenti nel data set impiegato (costituito per il 40% circa da terremoti localizzati a più di 14 km di profondità); la profondità del terremoto del 2002 suggerisce infatti che la generazione di scenari di livello 0 debba essere realizzata mediante modelli empirici predittivi a profondità controllata.

A questo proposito è interessante confrontare le predizioni effettuabili con diversi MEP, con particolare attenzione ai risultati a piccola distanza dalla faglia ($fd < 10\text{km}$)

poiché le simulazioni richieste per la modellazione degli effetti di sito riguardavano comuni situati in area epicentrale. La Figura 4.4-1 mostra i risultati ottenuti per l'evento del 31 ottobre in termini di PGA orizzontale in funzione della distanza dalla faglia (fd). Per $fd < 10$ km, la relazione SP95 sovrastima i valori di picco previsti da A95, mentre per $fd > 10$ km sia SP96 che A95 predicono valori simili di PGA e A95 presenta una maggiore dispersione; si noti che quest'ultimo è maggiormente rappresentativo di eventi caratterizzati da profondità simili a quella del terremoto molisano del 2002. La relazione regionale L06 può invece essere adottata solo in un *range* più ristretto di distanze e presenta una notevole dispersione e sottostima di un fattore 3 rispetto ad A95 nell'intero *range* di distanza esaminato: l'utilizzo di tale relazione dovrebbe essere considerato con cautela a causa della modesta magnitudo che caratterizza gli eventi del data set impiegato per ricavarla.

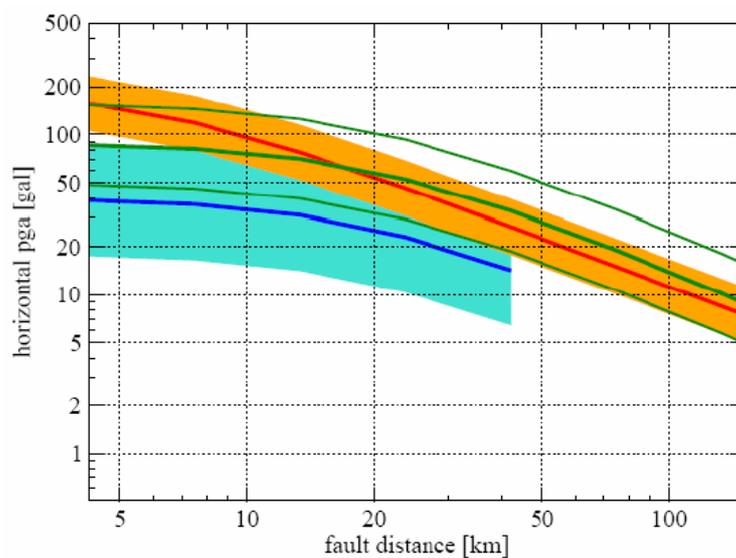


Figura 4.4-1 – Modelli empirici predittivi su roccia per il terremoto del Molise del 31 Ottobre 2002 secondo L06 (linea blu), SP96 (linea rossa) e A95 (linea verde spessa). Le area ombreggiate e le linee verdi sottili corrispondono a ± 1 std.

4.4.2 Livello1

Validazione del modello predittivo

Per il terremoto molisano del 2002, sono state suggerite due diverse coppie di sorgenti sismogenetiche. Vallée e Di Luccio (2005) hanno modellato il primo evento con un piano di faglia di 5.2×14.2 km² che si estende da 6.0 a 20.1 km di profondità (modello VDL31), e il secondo evento con un piano di faglia di 8.6×9.7 km² avente $z_{TOP} = 9.0$ km (modello VDL01). Sulla base di considerazioni sismotettoniche, Basili e Vannoli (2005) suggeriscono un piano di faglia simile per il secondo evento (modello BV01) ma associano il terremoto del 31 ottobre ad una faglia di 10.5×8.0 km² che si estende in profondità da 12 a 19,9 km (modello BV31). In relazione ai modelli suggeriti per il primo evento, la posizione dell'ipocentro strumentale implica una propagazione della rottura che, sui piani di faglia VDL31 e BV31, è bilaterale e

unilaterale verso Est, rispettivamente

Le stazioni accelerometriche più vicine (distanza ipocentrale < 60 km), hanno registrato il primo evento con livelli di scuotimento significativamente diversi. A parità di distanza le stazioni situate verso Est hanno registrato valori di accelerazione fino a 10 volte superiori rispetto alle stazioni localizzate a Ovest dell'epicentro.

I dati accelerometrici registrati durante l'evento del 31 ottobre sono stati perciò impiegati per verificare la presunta direttività della sorgente utilizzando il Deterministic-Stochastic Method (Pacor et al., 2005). Questo metodo di simulazione a faglia estesa risulta particolarmente per evidenziare gli effetti di direttività in alta frequenza ($f > 1$ Hz). La modellazione è stata effettuata ipotizzando una velocità costante di propagazione della rottura di 2.7 km/s e una distribuzione k^2 dello slip. La propagazione è stata modellata con un modello spettrale ricavato dall'inversione dei dati strong e weak motion registrati durante la sequenza molisana (si veda il *PS3-Deliverable D7*). Si è assunto un fattore di qualità $Q(f) = 37.7 f^{-1.2}$ ed un valore dipendente dal sito per il parametro k di decadimento spettrale (Anderson e Hough, 1984). Gli effetti locali sono stati considerati mediante l'utilizzo di una funzione di trasferimento empirica ricavata dai rapporti H/V stimati per ciascuna stazione di registrazione. In Figura 4.4-2 vengono confrontati gli spettri di accelerazione al bedrock simulati mediante il DSM con le faglie VDL31 e BV31 e gli spettri di accelerazione registrata corretti per la funzione di trasferimento di sito. Come si vede, il modello BV31 mostra in generale (ma soprattutto sulle stazioni poste ad Est dell'epicentro) un miglior accordo con i dati. In termini di RMS della differenza dei logaritmi delle ampiezze, si ottengono valori compresi tra 0.2 e 0.5 per BV31 e tra 0.4 e 0.5 per VDL31.

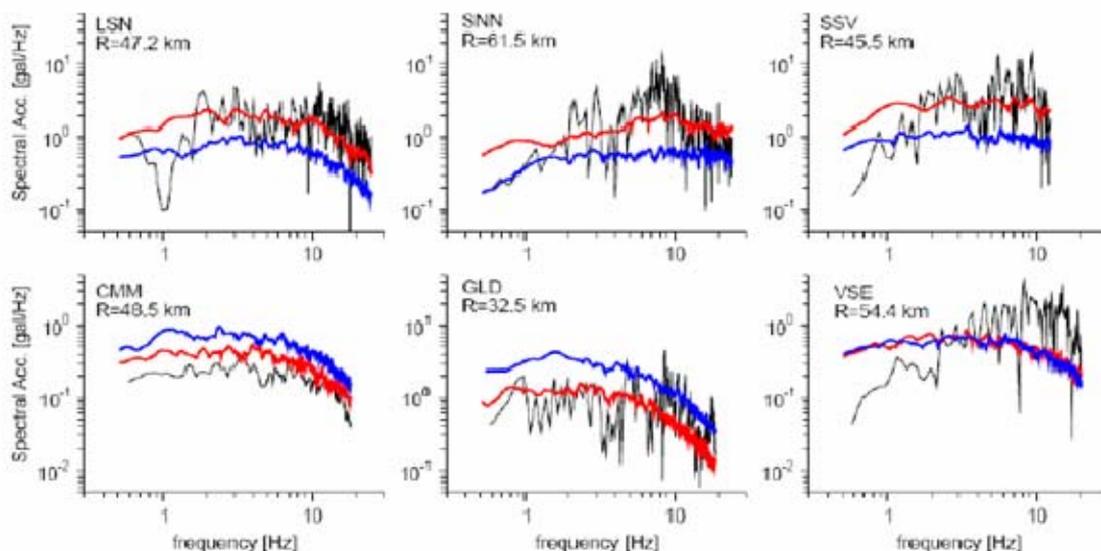


Figura 4.4-2. Evento del 31 Ottobre 2002: confronto fra gli spettri di accelerazione al bedrock simulati mediante DSM con le faglie VDL31 e BV31 (linee blu e rosse, rispettivamente) e gli spettri di accelerazione registrata corretti per la funzione di trasferimento di sito (linee nere). Si noti che le stazioni LSN, SNN e SSV sono situate a Est della zona epicentrale, mentre le stazioni CMM e GLD sono situate a Ovest.

Scuotimento atteso

Scenari di scuotimento al bedrock sono stati calcolati con la tecnica di simulazione DSM fino a 150 km di distanza epicentrale per entrambi gli eventi principali della sequenza molisana. E' stato impiegato il modello BV31 e BV01 in accordo con i risultati della procedura di validazione. Per simulare lo scuotimento atteso è stato adottato un valore di 0.02 s per il parametro k di decadimento spettrale.

La Figura 4.4-3 mostra le mappe di PGA ottenute per gli eventi del 31 Ottobre (BV31) e del 1 Novembre (BV01) 2002, mentre in Figura 4.4-4 viene mostrata la distribuzione di PGA cumulativa dovuta alle due scosse. E' interessante notare che quest'ultima risulta in buon accordo con la distribuzione osservata dell'intensità macrosismica. In particolare, l'area caratterizzata da $PGA > 100$ gal coincide approssimativamente con la zona avente $I_{MCS} > VI$ (Galli e Molin, 2004: Figura 2).

L'andamento della PGA in funzione della distanza dalla faglia, ottenuto mediando su tutti gli azimuth, è mostrato in Figura 4.4-5. Come si vede, la direttività della sorgente dell'evento del 31 ottobre, comporta un aumento dello scuotimento per distanze comprese tra 10 e 30 km e, nella zona epicentrale si ottiene uno livello di scuotimento medio attorno a 100 gal .

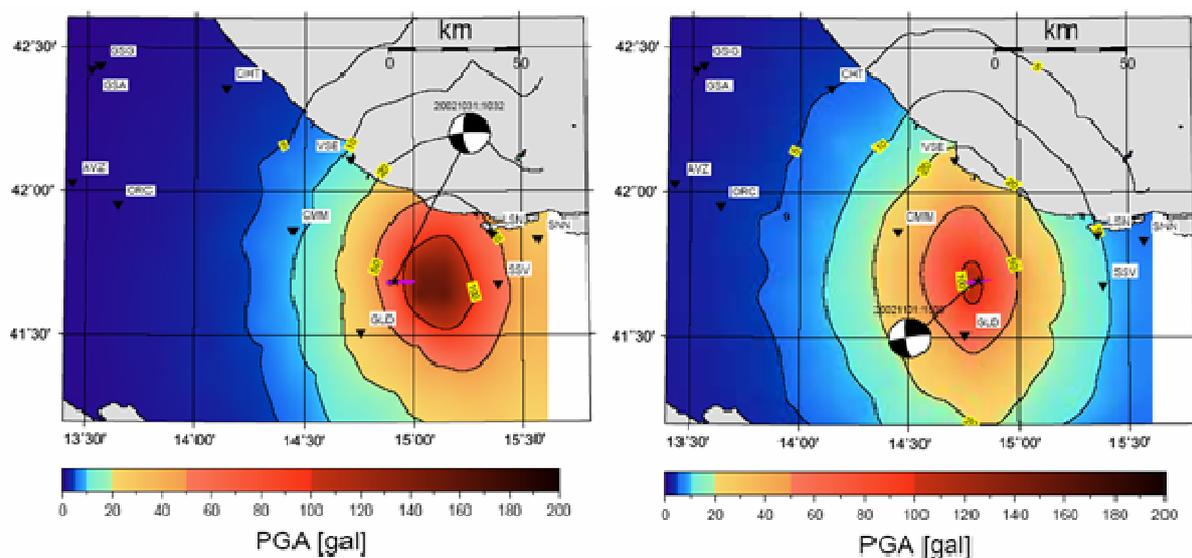


Figura 4.4-3. Distribuzione di PGA (componente orizzontale media) ottenuta mediante DSM con i modelli BV31 (a sinistra) e BV01 (a destra). Vengono mostrate anche le stazioni accelerometriche che hanno registrato gli eventi principali della sequenza molisana e le proiezioni in superficie delle faglie ipotizzate (linee viola). La stella nera indica la posizione dell'epicentro.

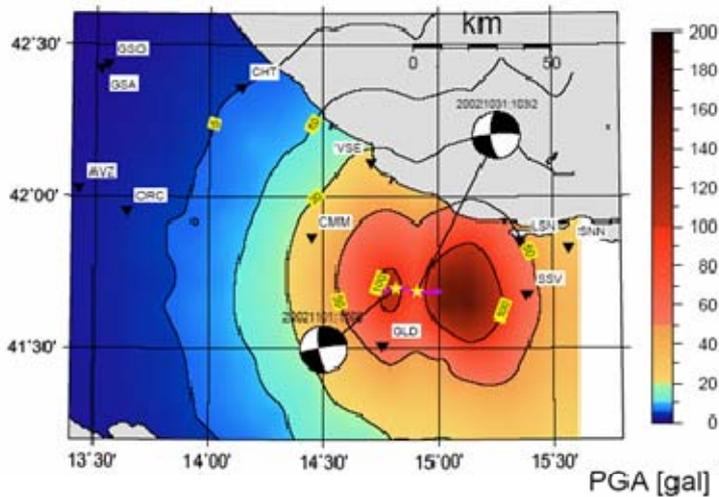


Figura 4.4-4. Distribuzione di PGA (componente orizzontale media) ottenuta mediante DSM combinando gli effetti delle scosse del 31 Ottobre e del 1 Novembre 2002. Vengono mostrate anche le stazioni accelerometriche che hanno registrato gli eventi principali della sequenza molisana e le proiezioni in superficie delle faglie ipotizzate (linee viola). Le stelle gialle indicano la posizione degli epicentri.

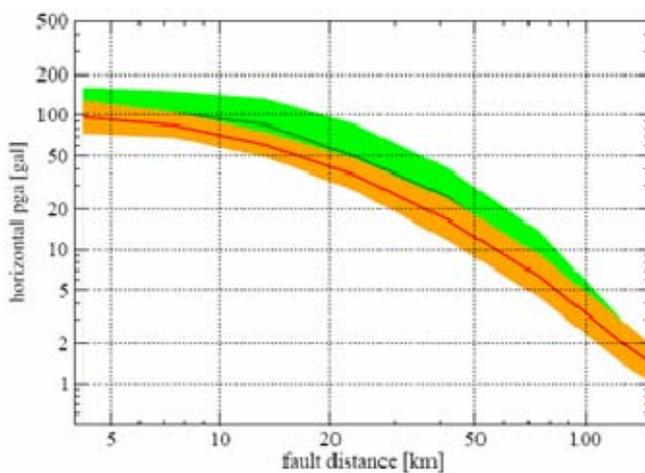


Figura 4.4-5. Componente orizzontale media della PGA ottenuta con i modelli BV31 e BV01 (linee verde e rossa, rispettivamente). Le aree colorate indicano i valori di PGA compresi nell'intervallo ± 1 std.

4.4.3 Livello2

Allo scopo di calcolare il moto sismico di riferimento per la modellazione degli effetti di sito in 5 località situate in area epicentrale, è stata utilizzata la tecnica Hybrid Integral Composite (HIC) sviluppata da Gallovic e Brokesova (2007). Si tratta di un metodo di simulazione che riproduce il campo d'onda completo in bassa frequenza (a partire da $f=0$ Hz) e compone il moto così ottenuto con il risultato di una simulazione a faglia estesa di tipo composito, nella quale la sorgente complessiva viene modellata da sottosorgenti di diversa dimensione distribuite in modo caotico sul piano di faglia. Il metodo è stato applicato con successo nella simulazione di

diversi terremoti (Atene, 1999, $M=5.9$; Kagoshima, 1997, $M=6.5$; Irpinia, 1980, $M=6.9$). Nell'area molisana il metodo HIC è stato applicato utilizzando il modello sismologico precedentemente definito. In Figura 4.4-6 vengono mostrate le serie temporali in accelerazione calcolate per gli eventi del 31 ottobre e del 1 novembre 2002. Come si vede, il moto orizzontale al bedrock può raggiungere generalmente una PGA massima di circa 100 gal e i due eventi producono serie temporali molto simili. Da questo punto di vista l'unica eccezione è rappresentata dalla stazione di Ripabottoni (RPB) che si trova in corrispondenza della proiezione superficiale della sorgente del secondo evento. Inoltre si può notare l'estrema somiglianza del moto al bedrock nel caso delle stazioni SGIA e SGIB, entrambe localizzate a S.Giuliano, sicuramente dovuta alla breve distanza di separazione che esiste tra i due ricevitori ($d < 500$ m).

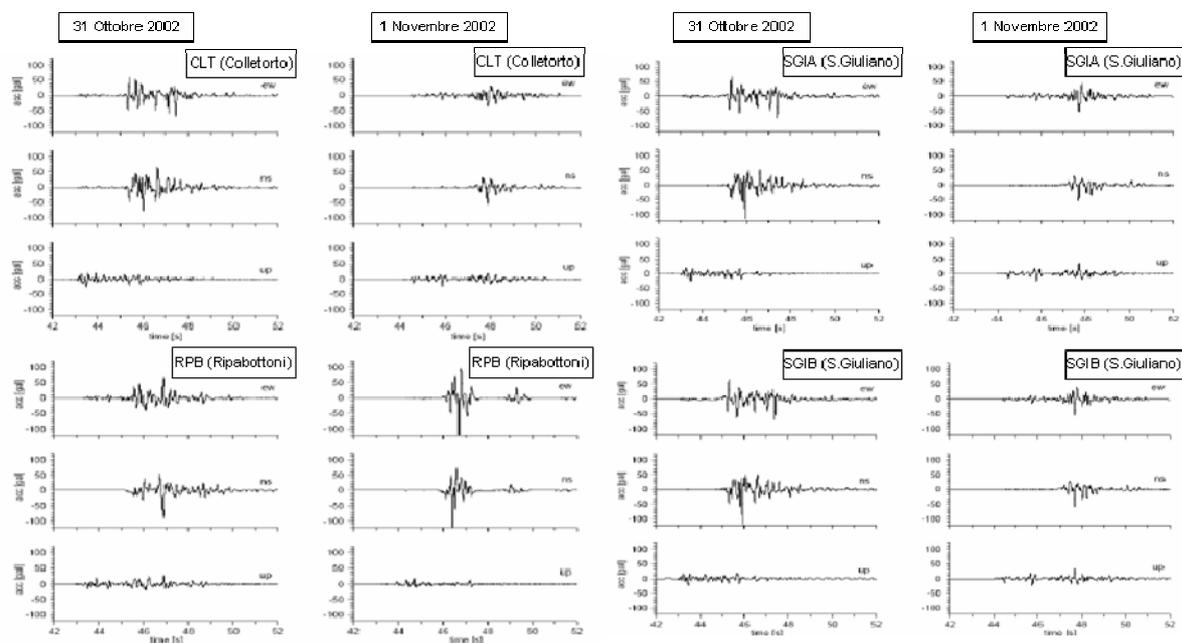


Figura 4.4-6. Accelerogrammi ottenuti con la tecnica HIC per gli eventi del 31 Ottobre e del 1 Novembre 2002 alle stazioni CLT (Colletorto); RPB (Ripabottoni) e SGIA- SGIB (S.Giuliano).

4.4.4. Confronto fra scenari a diverso livello di complessità

La scelta di considerare gli scenari di livello 2 per generare il moto di input per la modellazione degli effetti di sito, è stata verificata mediante un confronto reciproco di tutti gli scenari prodotti.

Le Figure 4.4-1; 4.4-5 e 4.4-6 evidenziano che in area epicentrale gli scenari al bedrock prodotti mediante A95 (livello 0), mediante DSM (livello I) e mediante HIC (livello II), producono valori di PGA attorno a 100 gal.

Il confronto fra accelerogrammi simulati e registrati può essere invece effettuato solo a distanze superiori. In particolare, il contenuto in frequenza delle serie temporali prodotte mediante HIC (livello 2) e DSM (livello 1) è stato confrontato con lo spettro di Fourier delle registrazioni a diverse stazioni localizzate fino a 50 km di distanza ipocentrale (Figura 4.4-7). Ad eccezione di SGI, i ricevitori selezionati per questo confronto corrispondono a stazioni accelerometriche localizzate sia a est (SSV) sia a

ovest (CMM e GLD) della sorgente. Considerato che, in accordo col modello di rottura ipotizzato per il primo evento, SSV e CMM sperimentano rispettivamente effetti di direttività e anti-direttività, si può notare dalla figura che i livelli spettrali in accelerazione prodotti da HIC sono molto meno influenzati dagli effetti di direttività rispetto ai corrispondenti livelli ottenuti mediante DSM. A distanze inferiori i due metodi producono generalmente livelli spettrali paragonabili, ed è importante notare che il livello spettrale simulato a GLD risulta anche essere in accordo con i dati. A S.Giuliano (SGI), situato nella proiezione in superficie della faglia, nella banda di frequenza 0.5-10 Hz il moto simulato mediante HIC e DSM presenta mediamente lo stesso contenuto spettrale.

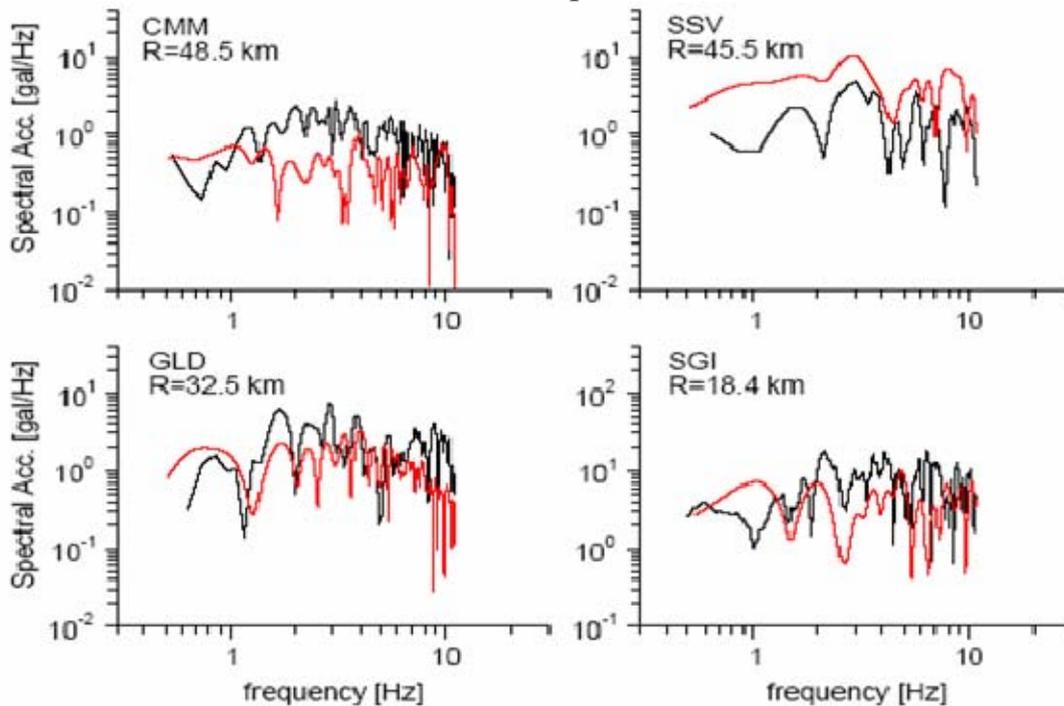


Figura 4.4-7. Spettri di Fourier in accelerazione simulati mediante HIC (linee nere) e DSM (linee rosse) alle stazioni CMM, SSV, GLD e SGI per l'evento del 31 Ottobre 2002 (componente NS).

Le accelerazioni sintetiche prodotte mediante i metodi HIC e DSM in area epicentrale ($f_d < 5$ km) vengono confrontate in Figura 4.4-8. Il moto al bedrock è stato calcolato ai 5 comuni sopra citati. Come si vede, dopo aver effettuato un filtraggio passa basso a 11 Hz, le serie temporali prodotte da DSM sono generalmente confrontabili con quelle ottenute mediante HIC. Le componenti orizzontali corrispondenti, prodotte con i due metodi, mostrano in generale ampiezza e contenuto in frequenza simili, anche se alcune stazioni (RPB a CLT ad esempio) evidenziano la differente sensibilità agli effetti direttivi dei due metodi. Le simulazioni ottenute con HIC mostrano comunque un maggior livello di complessità e durate maggiori, come conseguenza di una modellazione più dettagliata degli effetti di sorgente e di propagazione. Questo fatto risulta maggiormente evidente per i siti che sperimentano direttività in avanti. In tal caso infatti, le simulazioni DSM mostrano durate particolarmente brevi accompagnate da ampiezze rilevanti (si noti CLT ad esempio).

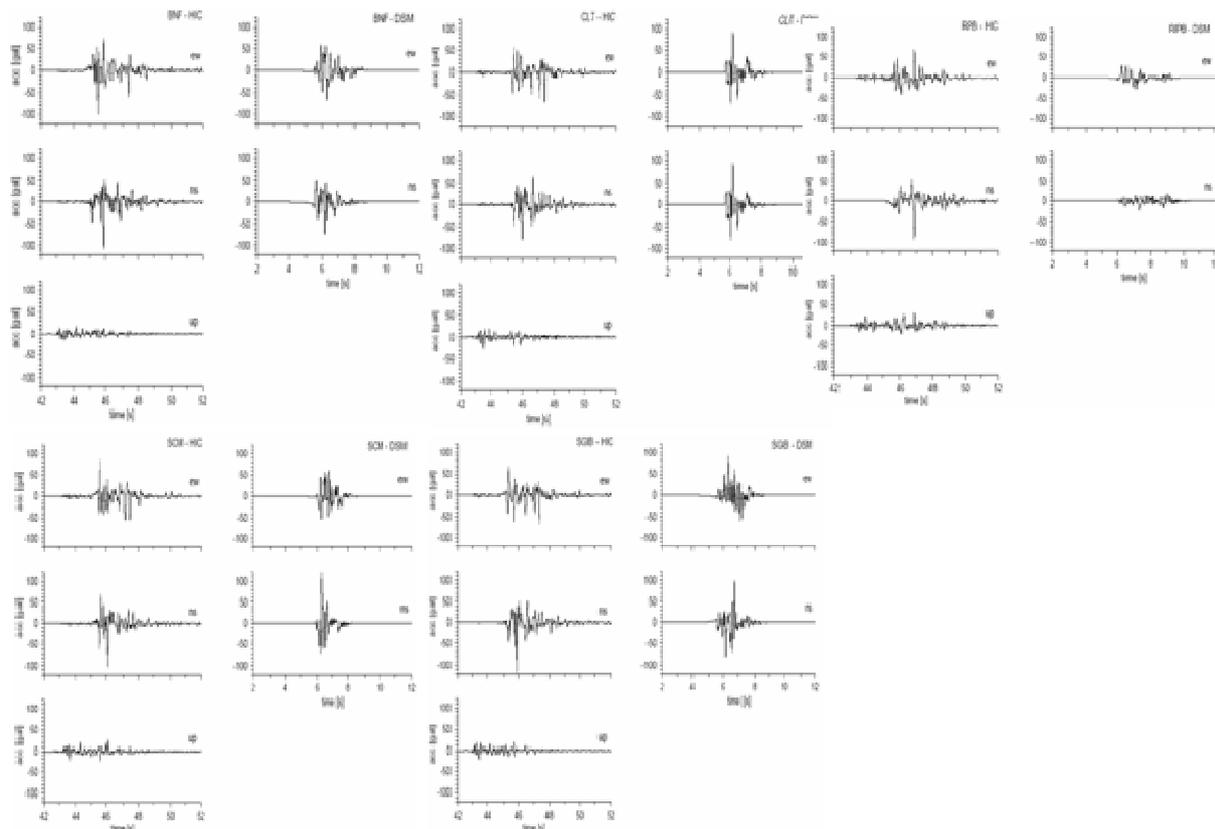


Figura 4.4-8. Accelerogrammi ottenuti con le tecnica HIC (livello II) e DSM (livello I) per l'evento del 31 Ottobre 2002 alle stazioni); BNF (Bonefro); CLT (Colletorto); RPB (Ripabottoni); SCM (Santa Croce di Magliano); SGI (S.Giuliano).

Il confronto dei risultati ottenuti con diversi metodi di simulazione conferma la complessità dell'area Molisana per quanto riguarda sia l'aspetto sismogenetico che le proprietà attenuative del mezzo di propagazione. Specialmente in un'area come questa, la predizione del moto deve essere vincolata alla richiesta di serie temporali che siano in grado di riprodurre differenti caratteristiche del campo d'onda. In particolare, la scelta di considerare gli scenari di livello 2 per generare il moto di input per la modellazione degli effetti di sito in area epicentrale è stata confermata dal confronto con i risultati ottenuti dalle simulazioni a minore livello di complessità.

5. CONCLUSIONI

Il progetto S3 ha realizzato scenari di scuotimento deterministici in quattro aree italiane, due scelte a scopo di previsione (Gubbio e Potenza) e due a scopo di validazione (Garda e Molise).

In tutte le aree, il calcolo degli scenari è stato svolto seguendo il seguente schema:

- a. individuazione delle faglie sismogenetiche potenzialmente pericolose per i siti e definizione delle loro caratteristiche geometriche e sismologiche (momento sismico, meccanismo focale, massimo spostamento) ;
- b. definizione della struttura e delle caratteristiche reologiche del mezzo di propagazione tramite velocità delle onde sismiche, densità e fattore di qualità o fornendo i parametri del modello di attenuazione e dello *spreading* geometrico;
- c. definizione degli intervalli di variabilità dei parametri cinematici descriventi il processo di rottura della sorgente (enucleazioni, distribuzioni di slip, rise time, velocità di rottura);
- d. applicazione di modelli empirici predittivi (MEP) e/o di tecniche di simulazione del moto sismico.

Gli scenari sono stati calcolati a diversi livelli di complessità, definiti in funzione delle tecniche di calcolo utilizzate per la stima del moto e riassunti in Tabella.

	Tecniche	Grandezze simulate	Variabilità associata
Livello 0	Modelli empirici predittivi del moto del suolo a scala regionale e nazionale (MEP, già chiamate leggi di attenuazione)	Valori di picco (PGA, PGV, PGD) Ordinate spettrali in intervalli di frequenza prefissati Altri parametri del moto (intensità di Arias, ...) Intensità macrosismica	Deviazione standard dei modelli empirici predittivi
Livello 1	Tecniche approssimate di simulazione	Serie temporali "approssimate" (ovvero calcolate su sorgente puntiforme o estesa, per campo vicino e lontano, solo per fasi dirette, con limiti in alta o bassa frequenza,...)	Analisi statistica relativa alla distribuzione dei parametri derivati da famiglie di serie temporali simulate.
Livello 2	Tecniche di simulazione larga banda a faglia estesa	Sismogrammi sintetici larga banda contenenti l'intero campo d'onda.	Analisi statistica relativa alla distribuzione dei parametri derivati da famiglie di sismogrammi sintetici simulate.

Seguendo questo schema generale, in ogni area gli studi di scenario sono stati realizzati con modalità specifiche, dipendendo dai singoli obiettivi.

Alla luce di queste esperienze, si evidenziano alcuni aspetti metodologici utili al fine di ottenere stime del moto affidabili e utilizzabili nelle successive applicazioni.

Prima di affrontare uno studio di scenario bisogna:

1. Stabilire i parametri del moto del suolo da predire

La scelta dei parametri del moto di interesse (picchi di accelerazione, velocità serie temporale) condiziona la scelta del metodo di simulazione adottato: infatti le tecniche *full-wave* sono idonee per il calcolo di spostamento e velocità a basse frequenze ($f < 2-3\text{Hz}$), mentre le tecniche semplificate si adoperano per la velocità e accelerazione ad alte frequenze ($f > 1\text{Hz}$). Le tecniche broad band, più onerose e necessarie di una buona definizione dei dati di ingresso, si utilizzano quando deve essere fornita la time series sull'intero intervallo di frequenze ingegneristiche (0-20Hz) e devono essere stimati parametri integrali che dipendono dall'intero accelerogramma come, ad esempio, l'intensità di Arias o la durata del moto.

Ad esempio nell'area di predizione di **Potenza**, i sismogrammi sintetici da utilizzare nelle successive stime di danno, sono stati calcolati a livello 2 con tecniche broad band in modo da fornire stime affidabili sia su parametri del moto del suolo in bassa frequenza (PGV) che su parametri ingegneristici legati alla durata (intensità di Arias), che non sempre è ben riprodotta dalle tecniche in alta frequenza.

Scenari di livello 2 sono stati calcolati anche nel caso del **Molise**, dove lo scopo era la generazione di accelerogrammi sintetici corrispondenti all'evento del 31 Ottobre 2002 per le successive valutazioni di effetti di sito con modelli 1D, 2D e 3D. La scelta di applicare una tecnica di livello 2 è stata dettata dall'esigenza di fornire accelerogrammi a larga banda, contenenti la maggior informazione possibile rispetto alla sorgente sismica e al mezzo di propagazione.

2. Stabilire la variabilità dei parametri dei modelli.

Questo punto dipende dallo scopo dello studio di scenario, ovvero se si è interessati a riprodurre un evento avvenuto oppure se si vuole definire un modello predittivo. In entrambi i casi bisogna stabilire i parametri fisici del modello di rottura, la cui definizione dipende dal grado di conoscenza deterministica, più o meno accurata, che vogliamo/possiamo includere.

Intervalli di variazione dei parametri cinematici della sorgente sismica sono sintetizzati in Appendice 2 di questo rapporto.

Ad esempio nel caso del **Garda** sono stati realizzati scenari predittivi di livello 1 sulla base dei risultati ottenuti dalla procedura di validazione, che ha consentito di fissare la geometria di sorgente, la velocità di rottura e il modello spettrale di attenuazione. Successivamente, è stata introdotta una variabilità sulla profondità che non risulta essere sufficientemente vincolata dalle osservazioni nell'intervallo fra 5 - 10 km e sono stati considerati 15 diversi punti di enucleazione, che non possono essere noti per eventi futuri distribuiti nella semimetà inferiore della faglia.

La variabilità dei parametri può essere ristretta anche in funzione della grandezza del moto del suolo che si intende studiare. Ogni combinazione dei parametri cinematici di sorgente contribuisce in modo diverso alle serie temporali del movimento del terreno, e di conseguenza ai valori dei parametri *ground motion* (PGA, PGV, PGD, ordinate spettrali, spostamento statico). La quantificazione dell'influenza del singolo parametro cinematico sulle stime del *ground motion* è strettamente legata alla geometria sito-sorgente e all'approccio utilizzato per valutarla (si veda **Appendice 2**).

3. Calibrare i modelli utilizzando registrazioni di terremoti avvenuti.

La simulazione di eventi del passato avvenuti nella stessa area dove si intende effettuare la predizione del moto è un passaggio utile sia per calibrare alcuni parametri dei modelli, ad esempio in termini di attenuazione anelastica o delle caratteristiche a grande scala del mezzo di propagazione, sia per verificare le capacità di riprodurre i dati osservati con le tecniche numeriche adottate. Inoltre dal confronto fra dati reali e simulati è possibile una stima quantitativa dell'incertezza nella stima del moto, dipendente dalla mancanza di informazione o inadeguatezza delle tecniche adottate.

Ad esempio nell'area di **Gubbio**, è stato riprodotto il terremoto del 1984 (M 5.7) che ha permesso di verificare sia la bontà dei parametri descrittivi il mezzo di propagazione e il modello di attenuazione sia l'adeguatezza delle tecniche di simulazione adottate successivamente per il calcolo degli scenari predittivi.

Una volta prodotti gli scenari ottenuti variando i modelli di rottura o le geometrie delle sorgenti sismogeniche è necessario:

4. Stabilire i criteri per la selezione dello scenario

Una volta generati, gli scenari di scuotimento per uno studio predittivo, si procede alla selezione di uno o più scenari in base alle richieste dell'utente ed alla distribuzione statistica dei risultati.

Gli scenari selezionati devono soddisfare dei requisiti predefiniti che dipendono dall'obiettivo di utilizzo. Un tipico esempio è la selezione in base al confronto con un valore di un qualsiasi parametro *ground-motion* (quali PGA, PGV, ordinate spettrali) definito o tramite modelli predittivi o da studi probabilistici.

Ad esempio nell'area di **Gubbio**, la valutazione degli effetti di sito è stata effettuata a partire dallo scenario al bedrock che forniva valori medi confrontabili con i valori medi ottenuti dall'applicazione di un modello empirico predittivo.

Un'altra possibilità consiste nell'utilizzare i parametri della distribuzione dei valori generati dall'insieme degli scenari calcolati, quali la massima probabilità di occorrenza (valore modale), valori estremi, media e percentili. Ad esempio per l'area di **Potenza**, sono state fornite direttamente le distribuzioni dei parametri strong motion ottenute variando i parametri cinematici sulle tre faglie valutate come le più pericolose per il sito, a seguito di analisi con tecniche semplificate. Inoltre sono stati forniti 2 famiglie di 7 accelerogrammi caratterizzati da valori di accelerazione di picco e dell'intensità di housner nell'intorno dei valori mediani delle rispettive distribuzioni.

5. Confrontare gli scenari a vari livelli di complessità

In uno studio di scenario è importante, per alcuni siti campione, verificare l'attendibilità delle stime, confrontando i risultati dello studio di scenario a vari livelli di complessità. Questo confronto permette, infatti, da una parte di valutare l'attendibilità delle stime ottenute con le tecniche più sofisticate e

dall'altra valutare il grado di approssimazione introdotto dalle tecniche più semplificate. Il confronto fra scenari a diversi livelli è stato condotto in tutte le aree.

Dallo studio dell'area del **Garda** è emerso che anche nel caso di sorgenti di media magnitudo, la forma del campo di scuotimento generato a livello 1 può differire dalle predizioni basate sull'ipotesi di sorgente puntiforme. Ad esempio si è visto che la zona di massimo risentimento prodotta dallo scenario di livello 1 rispecchia la geometria della faglia ipotizzata, contrariamente alla predizione di livello 0, che mostra invece una simmetria circolare e conseguentemente non riesce a riprodurre in modo adeguato gli effetti di anisotropia del campo macrosimico osservati a breve distanza.

Nell'area di **Gubbio**, i sismogrammi generati a livello 1 e 2 sono molto simili, indicando che effetti di sorgente associati alle basse frequenze non determinano contributi significativi nel moto del suolo al bedrock.

Nell'area del **Molise**, la scelta di considerare gli scenari di livello 2 per generare il moto di input per la modellazione degli effetti di sito in area epicentrale, è stata confermata dal confronto con i risultati ottenuti dalle simulazioni a minore livello di complessità che mostrano valori di picco e contenuto in frequenza simile ma forme d'onda semplificate.

Nell'area di **Potenza**, l'utilizzo di una tecnica di simulazione semplificata di livello 1 ha consentito la selezione preliminare delle sorgenti a più alta pericolosità, su cui simulare poi il moto del suolo con una tecnica *broad-band* in campo completo di livello 2.

BIBLIOGRAFIA

- Ambraseys, N.N. (1995). The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 24, 467-490.
- Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K., Smit, P.M. (2005). Equations for the Estimation of Strong Ground Motion from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3, 1-53.
- Anderson, J.G., Hough, S. (1984), A model for the shape of Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 1969-1994.
- Andrews, D. J. (1976), Rupture velocity of plane strain shear cracks, *J. Geophys. Res.*, 81, No. 32, 5679-5687
- Basili, R., and Vannoli, P. (2005). Source ITGG052 San Giuliano di Puglia and Source ITGG053 Ripabottoni. In: DISS Working Group, Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.0.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://www.ingv.it/DISS/> - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Bazzurro, P. and C. A. Collin (1999). Disaggregation of Seismic Hazard. *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 2, 501-520.
- Bindi D., Luzi L., Pacor F., Franceschina G. and Castro R.R. (2006). Ground-motion predictions from empirical attenuation relationships versus recorded data: the case of the 1997-1998 Umbria-Marche, Central Italy, strong-motion data set, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 96, 3, 984-1002.
- Bizzarri, A., Cocco M., Andrews D. J., Boschi E., 2001. Solving the dynamic rupture problem with different numerical approaches and constitutive laws. *Geophys. J. Int.* 144, 656-678
- Boore, D.M. [2003] "Simulation of ground motion using the stochastic method," *Pure Appl. Geophys.* 160, pp. 635-676.
- Boore, D.M., Joyner, W.B., and Fumal, T. E.(1997). Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A summary of Recent Work. *Seism. Res. Lett.*, 68, 128-153.
- Bouchon, M. Bouin, M.-P. Karabulut, H. Toksoz, M. N. Dietrich, M.; Rosakis, A. J., (2001). How Fast is Rupture during an Earthquake? New Insights from the 1999 Turkey Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 14, 2723-2726.
- Chapman, M. C. (1995). A Probabilistic Approach to Ground-motion Selection for Engineering Design. *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 937-942
- Convertito, V., A. Emolo and A. Zollo (2006). Seismic hazard assessment for a characteristic earthquake scenario: an integrated probabilistic – deterministic method. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, No. 2, 377-391, doi: 10.1785/0120050024.
- Convertito, V., and A. Herrero (2004). Influence of focal mechanism in probabilistic seismic hazard analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 94, 2124-2136.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583-1606
- Das, S. and Aki, K. (1977) A numerical study of two-dimensional spontaneous rupture propagation, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 50, 643-668.
- Day, S. (1982) Three-dimensional finite-difference simulation of fault dynamics: rectangular faults with fixed rupture velocity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 705-727.
- DISS Working Group (2006). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://www.ingv.it/DISS/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- DPC-USSN (2004). Monitoring System Group – The strong motion records of Molise sequence (October 2002 – December 2003). CD-ROM, 2004.
- Eshelby J.D. (1957). The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceedings of the Royal Society, London A* 241, 376-396.

- Faccioli, E., Cauzzi, C. (2006). Macroseismic intensities for seismic scenarios, estimated from instrumentally based correlations. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September, Paper Number: 569
- Galli, P. and Molin, D. (2004), Macroseismic Survey of the 2002 Molise, Italy, Earthquake and Historical Seismicity of San Giuliano di Puglia, *Earthquake Spectra*, 20-S1, S39-S52.
- Gallovic, F. and Brokesova, J. (2007), Hybrid k-squared Source Model for Strong Ground Motion Simulations: Introduction, *Physics .Earth. Planet. Int.*, 160, 34-50.
- Grandori, G., Drei, A., Perotti, F., Tagliani, A. (1991). Macroseismic intensity versus epicentral distance: the case of Central Italy, *Tectonophysics*, 193, 165-171.
- Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>
- Heaton, T. H. (1990) Evidence for and implication of self-healing pulses of slip in earthquake rupture, *Phys. Earth Planet. Int.*, 64, 1-20.
- Herrero A. e P. Bernard (1994). A kinematic self-similar rupture process for earthquakes *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1216-1228.
- Kanamori H. (1977). The energy release in great earthquakes, *J. of Geophys. Res.*, 82, 2981-2987.
- Luzi, L., Morasca, P., Zolezzi, F., Bindi, D., Pacor, F., Spallarossa, D., Franceschina, G. (2006). Ground motion models for Molise region (Southern Italy), 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 3-8 September 2006, Geneva, Switzerland, CD-ROM Proceedings, Paper No.938.
- Mai P. M., P. Spudich e J. Boatwright (2005). Hypocenter locations in finite-source rupture models, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, 965-980.
- Manighetti I., G. King, Y. Gaudemer, C. Scholz e C. Doubre (2001). Slip accumulation and lateral propagation of active normal fault in Afar, *J. Geophys. Res.*, 106,13667-13696.
- Manighetti I., M. Campillo, C. Sammis, P. M. Mai, and G. King, (2005). Evidence for self-similar, triangular slip distributions on earthquakes: Implications for earthquake and fault mechanics, *J. Geophys. Res.*, 110.
- Margottini, C., Molin, D., Serva, L. (1992). Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data, *Engineering Geology*, 33, 45-58
- Massa, M., Marzorati, S., D'Alema, E., Di Giacomo, D., Augliera, P. (2007). Site classification assessment for estimating empirical attenuation relationships for Central-Northern Italy earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, 2007, in press.
- McGuire, R. K. (1995). Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the loop. *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1275-1284
- McGuire, R. K. and K. M. Shedlock (1981). Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States, *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 1287-1308.
- Nolet G., S. Krueger e R. M. Clouser (1998). Empirical determination of depth-distance corrections for mb and Mw from Global Seismograph Network stations, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1451-1454.
- Olson, A.H., Orcutt, J.A., and Frazier, G.A., 1984, The discrete wavenumber / finite element method for synthetic seismograms, *Geophys. J.R. Astr. Soc.*,v.77,421-460.
- Pacor, F., Cultrera, G., Mendez, A. , Cocco, M. [2005]. "Finite Fault Modeling of Strong Ground Motion Using a Hybrid Deterministic - Stochastic Method," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, 225-240.
- PS3-Deliverable D0 (2006). Task1 - Scenari di Scuotimento - Deliverable D0 - Tecniche di simulazione, Giugno 2006
- PS3-Deliverable D2 (2007). Task1 - Scenari di Scuotimento - Deliverable D2 - Innovative approaches to predict seismic ground motion, July 2007
- PS3-Deliverables D3-D4-D5 (2007). Task2 - Effetti di sito - Deliverables D3-D4-D5 Linee guida per l'introduzione degli effetti di sito negli studi di scenario, Luglio 2007
- PS3-Deliverable D7 (2007). Task3 - Molise - Deliverable D7 - Validation shaking scenarios, July 2007
- PS3-Deliverable D13 (2007). Task 4 - Garda - Deliverable D13 - Scenari di scuotimento al bedrock a

- vari livelli di complessità, Luglio 2007
- PS3-Deliverable D17 (2007). Task5 – Potenza – Deliverable D17 - Bedrock shaking scenarios, July 2007.
- PS3-Deliverable D20 (2007). Task6 – Gubbio – Deliverable D20 - Bedrock shaking scenarios, July 2007
- QUEST (QUick Earthquake Survey Team) (2005). Rilievo macrosismico del terremoto del Garda del 24 novembre 2004, *Ingegneria Sismica*, Anno XXII - N.2, 44-59.
- Reiter, L. (1990). *Earthquake hazard analysis*. Columbia University Press, New York, 254 pp.
- Rosakis, A. J. Samudrala, O. Coker, D. (1999). Cracks Faster than the Shear Wave Speed, *Science*, 5418, 1337-1339
- Ruiz J. A. (2007). *Modélisation d'accélérogrammes synthétiques large-bande par modélisation de la cinématique de la rupture sismique*. Tesi di Dottorato dell'Institut de Physique du Globe de Paris, France.
- Sabetta, F., Pugliese, A. (1996). Estimation of response spectra and simulation of non-stationary earthquake ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 337-352.
- Scholz C. H. (2003). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 2nd edn., Cambridge University Press.
- Somerville, P. Irikura, K. Graves, R. Sawada, S. Wald, D. Abrahamson, N. Iwasaki, Y. Kagawa, T. Smith, N. Kowada, A., (1999). Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, *Seism. Res. Lett.* 70, 1, 59-80
- Sommerville, P.G., Smith, H.F., Graves, R.W., Abrahamson, N.A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relationship to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seism. Res. Lett.* 68, 1, 199-222.
- Spudich, P., Xu, L., Documentation of software package Compsyn svx3.11: programs for earthquake ground motion calculation using complete 1-d green's functions, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology CD*, Int. Ass. Of Seismology and Physics of Earth's Interior, Academic Press, 2002.
- SSN (2005). *Dati accelerometrici prodotti dalla RAN (Rete accelerometrica Nazionale)*, Dip.Prot.Civ.-Ufficio Servizio Sismico Nazionale – Servizio Sistemi di Monitoraggio.
- Tinti E., E. Fukuyama, A. Piatanesi e M. Cocco (2005). A kinematic source-time function compatible with earthquake dynamics, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, 1211-1223.
- Vallée, M. and Di Luccio, F. (2005), Source analysis of the 2002 Molise, southern Italy, twin earthquakes (10/31 and 11/01), *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12309.
- Wells D. L. e K. L. Coppersmith (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- Youngs R. R., and K. Coppersmith (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 939-964.

APPENDICE 1: TECNICHE DI SIMULAZIONE

Di seguito vengono descritte due tecniche di simulazione utilizzate nell'ambito del Progetto S3 (Deliverable D0): COMPSYN, metodo *full-wave* per il calcolo di spostamento e velocità ($f < 2-3\text{Hz}$), e DSM, metodo semplificato per velocità e accelerazione ($f > 1\text{Hz}$).

1) COMPSYN

Compsyn (Spudich and Xu, 2002) è un codice deterministico per il calcolo di sismogrammi sintetici generati da una sorgente finita. La propagazione delle onde è modellata attraverso l'uso di funzioni di Green, calcolate in campo completo (campo vicino e campo lontano) con la tecnica dei numeri d'onda discreti ed elementi finiti (Olson et al. 1984). Il modello di propagazione considerato è 1D e non include l'attenuazione anelastica. Una volta calcolate le funzioni di Green per un data struttura crostale, il codice permette di simulare diversi modelli di rottura in un breve tempo macchina. Il costo computazionale aumenta con il cubo del numero di lunghezze d'onda che separano la sorgente dall'osservatore; per questo motivo Compsyn viene utilizzata come tecnica a bassa frequenza.

Le serie temporali sono calcolate in velocità e spostamento ed includono la componente statica ($f=0\text{Hz}$).

2) DSM (Deterministic Stochastic Method)

DSM è un metodo stocastico per il calcolo di sismogrammi sintetici generati da una sorgente finita (Pacor et al., 2003). Questo codice implementa la tecnica stocastica per sorgente puntiforme (Boore 1983) includendo gli effetti della propagazione della rottura su un piano di faglia. DSM è una tecnica che riproduce unicamente le fasi delle onde S dirette e le cui approssimazioni rendono le simulazioni valide ad alta frequenza ($f > 0.5\text{ Hz}$). La procedura può essere schematizzata in tre passaggi principali:

step_1. A partire da un modello di rottura semplificato, il codice calcola l'involuppo della serie temporale in accelerazione irradiato da una faglia estesa (teoria delle isocrone);

step_2. L'involuppo deterministico viene normalizzato e moltiplicato per una serie temporale di rumore bianco gaussiano. In questo modo la parte incoerente del campo d'onda viene riprodotta stocasticamente;

step_3. L'involuppo risultante viene trasformato secondo Fourier nel dominio delle frequenze e moltiplicato per l'ampiezza dello spettro di una sorgente puntiforme, per poi ritornare nel dominio del tempo attraverso l'anti-trasformata di Fourier.

Le serie temporali sono calcolate in accelerazione e velocità e non includono la componente statica.

Entrambe le tecniche necessitano di una parametrizzazione del mezzo di propagazione (modello di velocità 1D) e del processo di rottura sul piano di faglia, suddivisa in un numero finito di sottofaglie.

APPENDICE 2: PARAMETRI CINEMATICI DELLA SORGENTE SISMICA

La sorgente sismica può essere descritta con un numero limitato di parametri fisici: i parametri che danno informazione sulla geometria (dimensione della faglia -L e W-, numero di sottofaglie, meccanismo focale e distribuzione degli osservatori) e parametri cinematici sul piano di faglia (velocità di rottura, distribuzione della dislocazione sul piano di faglia, momento sismico, funzione sorgente analitica per descrivere la velocità di *slip*, *rise time*, picco di velocità di *slip*, *rake*, posizione del punto di enucleazione, *stress drop*).

Per la definizione di scenari, questi parametri possono essere fissati liberamente nell'ambito dei loro limiti fisici comunemente accettati. Gli studi sulla dinamica della sorgente sismica e sulle legge di scala permettono più o meno di ridurre la variabilità. È quindi utile definire questi limiti e i riferimenti associati per ciascun parametro cinematico.

La magnitudo. Questo parametro è generalmente il principale parametro d'input. L'unica accortezza necessaria è la verifica del tipo di magnitudo impiegato, poiché nei metodi per ottenere sintetici, occorre il più delle volte convertire la magnitudo in momento sismico tramite la relazione di Kanamori (1977). Un passo supplementare è dunque necessario se la magnitudo non corrisponde alla magnitudo-momento e, in questo caso, si deve verificare se l'equivalenza delle magnitudo nel contesto considerato è valida o eventualmente utilizzare una formula di trasformazione (Nolet et al., 1998).

$$\text{Log}_{10}(M_0) = 1.5 \text{Mag} + 9.1 \quad (\text{da Kanamori, 1977})$$

$$M_0 = \mu S \overline{\Delta u}$$

dove M_0 è il momento sismico (N.m), Mag è la magnitudo di momento, S è la superficie della faglia (m^2) e $\overline{\Delta u}$ è lo *slip* medio (m).

Stress drop, lunghezza della faglia, larghezza della faglia, slip medio sulla faglia e momento sismico. Come ampiamente riportato in letteratura, tutti questi parametri sono collegati fra loro con delle leggi di scala (Wells e Coppersmith, 1994; Scholz, 2003). Per esempio, se la geometria della sorgente (lunghezza L e larghezza W) è fissata per un dato momento sismico, allora lo *stress drop* e lo *slip* medio sulla faglia diventano anche loro fissati dalle leggi di scala (Eshelby, 1957):

$$\frac{\Delta\sigma}{\mu} = c \frac{\overline{\Delta u}}{D} \quad (\text{da Eshelby, 1957})$$

dove $\Delta\sigma$ è il *stress drop* (Pa), μ è la rigidità (Pa), $\overline{\Delta u}$ è lo *slip* medio (m), D è la dimensione caratteristica della faglia (m); tali parametri assumono generalmente i seguenti valori: $\mu \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, $\Delta\sigma / \mu \approx \overline{\Delta u} / D \approx 10^{-4} - 10^{-5}$.

La scelta della dimensione caratteristica D da usare in tale formulazione è molto dibattuta (si veda in letteratura la serie di articoli pubblicati da Scholz e

Romanowicz); è comunque preferibile utilizzare come dimensione caratteristica la più piccola dimensione della faglia (in genere $D=W$) per evitare uno slip medio eccessivamente alto.

Profondità della sorgente. La profondità dell'evento è sempre un parametro difficile da vincolare. Essa dipende principalmente dallo spessore della crosta fragile e quindi dal contesto tettonico della regione. L'eventuale presenza di una zona di subduzione ne complica la scelta. L'effetto della profondità sul segnale è una diminuzione delle ampiezze all'epicentro, associato ad un'attenuazione geometrica apparente più debole. Dal punto di vista della massimizzazione della pericolosità, la profondità viene di solito considerata abbastanza superficiale e deve in ogni caso contenere la faglia. In particolare, al di sopra di una certa magnitudo la faglia si rompe in larghezza per la totalità della parte fragile della crosta.

La posizione del punto d'enucleazione. Questo parametro è molto importante perché ha un'influenza notevole sulla direttività della sorgente sismica. Purtroppo è difficile, per non dire impossibile, definire questa posizione. Generalmente la posizione è limitata alla metà inferiore della faglia, dove è maggiore la pressione di confinamento (e.g. Mai et al., 2005).

Velocità di rottura. La velocità di rottura (V_r) rappresenta la velocità con cui si propaga il fronte di rottura sul piano di faglia. L'andamento della propagazione è generalmente variabile sul piano di faglia ma, per semplificare il problema, V_r può essere considerata in prima approssimazione costante. In letteratura, i valori di V_r sono pari ad una frazione della velocità delle onde S (V_s) e sono limitati generalmente tra 60% di V_s e la velocità delle onde di Rayleigh ($0.92*V_s$), come suggerito anche dalle modellazioni teoriche dinamiche (Andrews 1976; Bouchon et al., 2001; Bizzarri et al., 2001); si noti che la velocità di rottura influenza la durata del segnale ma è anche il parametro fondamentale per la direttività: più il rapporto fra V_r e V_s si avvicina a 1, più l'effetto è importante.

La modellazione cinematica di terremoti recenti (Duzce, 1999, o di Denali, 2002) ha messo in evidenza che una parte della loro rottura ha avuto una velocità $V_r > V_s$ (*super-shear*) e, in condizioni particolari, anche i modelli dinamici ammettono tali valori (Andrews 1976; Rosakis et al., 1999). Un modello di rottura *super-shear* presenta comunque delle anomalie cinematiche che ne rendono difficile la simulazione, poiché genera un'onda d'urto che può creare ampiezze poco fisiche soprattutto in accelerazione.

Recentemente alcuni autori hanno cominciato a considerare modelli di rottura con velocità variabile sul piano di faglia. Per esempio Ruiz (2007), con l'aiuto di considerazioni dinamiche, collega la variazione della velocità di rottura alla variazione di slip sulla faglia con una relazione del quarto ordine. Questo tipo di relazione permette che i gradienti spaziali della velocità e dello slip siano lineari, generando quindi fasi molto forti d'accelerazione e d'arresto. In Appendice 3 è stata utilizzata una relazione intermedia descritta con una dipendenza al secondo ordine, per rendere più omogenea l'evoluzione del fronte di rottura.

Distribuzione di slip sulla faglia. La conoscenza della distribuzione di dislocazione

finale (*slip*) sul piano di faglia diventa importante quando le simulazioni devono includere un contenuto in alta frequenza o essere effettuate ad una distanza ravvicinata della sorgente. La maniera più semplice per ottenere un'eterogeneità a tutte le lunghezze d'onda, compatibile con le leggi di scala, è di usare una distribuzione self simile (Herrero e Bernard, 1994) con una fase stocastica. La scelta del numero di aree con concentrazione di massimo *slip* (*patch*) e la loro posizione può generare una importante variabilità sul moto del suolo vicino la sorgente (Somerville et al., 1999; Manighetti et al. 2005). Recenti lavori propongono un'analisi statistica delle osservazioni del profilo di dislocazione lungo la faglia in presenza della rottura in superficie (Manighetti et al., 2001) o il rapporto fra posizione della enucleazione e quella delle *patches* (Mai et al., 2005). Siccome non esistono osservazioni consolidate su questo problema, è importante considerare più casi possibili, soprattutto quelli che generano grandi valori i picco del moto.

Velocità di *slip*, *rise time* e la funzione sorgente. La velocità di *slip* è una funzione che dipende dal tempo e dalla posizione sul piano di faglia. Rappresenta l'andamento temporale con cui ogni punto sul piano di faglia raggiunge la sua dislocazione finale. L'integrale di tale funzione è infatti la dislocazione totale. L'intervallo di tempo in cui viene accumulato lo *slip* si definisce *rise time*. In letteratura sono stati proposti diversi modelli dinamici di rottura: modelli a *crack* (Das e Aki, 1977; Day, 1982) e modelli a *pulse* (Tinti et al., 2005; Heaton 1990). Nel primo caso, la cicatrizzazione della rottura avviene tramite un fronte di retro-propagazione che parte dai bordi della faglia una volta raggiunti dal fronte di rottura. In questo caso il *rise time* è paragonabile all'intera durata dell'evento e dipende dalla dimensione del piano di rottura. Nel secondo caso (modelli a *pulse*) il fronte di rottura è seguito da un fronte di cicatrizzazione e la durata del *rise time* è di conseguenza inferiore ed indipendente dalla durata della rottura. In letteratura il *rise time* assume valori eterogenei o costanti sul piano di faglia; si noti che una distribuzione costante produce un filtro bassa-basso sul sismogramma (proporzionale a f^{-1}).

Nella modellazione cinematica (sia per le inversioni che per gli scenari) si utilizzano di solito questi modelli a *pulse*, assumendo a priori una funzione sorgente analitica. Alcune delle funzioni sorgente utilizzate in letteratura sono: la *boxcar*, l'esponenziale, il coseno, il triangolo, la Yoffe regolarizzata (Tinti et al. 2005). Questa ultima è stata recentemente proposta per la sua somiglianza con le velocità di *slip* ricavate da modellazioni dinamiche spontanee.

Nonostante siano tante le funzioni utilizzate in letteratura, vogliamo sottolineare l'importanza di utilizzare funzioni sorgenti compatibili con la dinamica della rottura, che non contengano cioè singolarità (né alla fase di rottura né alla fase di cicatrizzazione) e la cui fase di accelerazione positiva per raggiungere il valore di picco di velocità di *slip* sia di durata finita ed indipendente dalla durata del *rise time*. Generalmente il picco di velocità di *slip* può raggiungere valori di qualche metro/secondo.

descrivono la sorgente: velocità di rottura, punto di enucleazione, funzione sorgente e distribuzione di slip. Di seguito sono schematizzati i valori assegnati ai singoli parametri.

h (km)	Vp (km/s)	Vs=Vp/1.81	Qs	rho (g/cm3)	comments
0	3.5	1.93	100	2.3	Apula platform
2	4.5	2.49	100	2.5	
4	5.7	3.15	100	2.6	
10	6.5	3.59	100	2.7	
25	7.5	4.14	100	2.9	
35	8.1	4.48	100	3.2	Moho

Tabella 1. Modello di propagazione proposto da Improta (comunicazione personale, 2005) a partire dal lavoro di Amato e Selvaggi (1993, Ann. Geofis).

Velocità di rottura. Sono state usate 5 differenti velocità di rottura.

Le prime tre sono pari al 70%, 80% e 90% della velocità delle onde S ($V_s=3.0$ km/s):

$V_{r1}=2.1$ km/s, $V_{r2}=2.4$ km/s, $V_{r3}=2.7$ km/s;

V_{r4} cresce con la distanza dall'ipocentro R

$$V_{r4} = R \cdot 0.035 + 0.6 \cdot V_s \text{ con } V_{r\max} = 0.92 V_s;$$

V_{r5} è proporzionale alla distribuzione di slip(x,y)

$$V_{r5} = (0.32 \cdot (\text{slip}(x,y) / \text{slip}_{\max})^2 + 0.6) \cdot V_s, \text{ con } V_{r\max} = 0.92 \cdot V_s \text{ (Ruiz, 2007).}$$

Punti di enucleazione: Sono stati considerati 5 punti di enucleazione nella metà inferiore della faglia (10 km lungo il dip; si veda Figura 1b) e posizionati a distanza crescente dal bordo A-D della faglia (coordinate lungo strike: 0- 8.9-17.8-26.7-35 km).

Distribuzione di slip. Sono state utilizzate tre diverse distribuzioni di slip, calcolate secondo il modello k-quadro (Herrero and Bernard, 1994; Galovic and Brokešová, 2004), che differiscono tra loro per la posizione delle asperità (Figura 2).

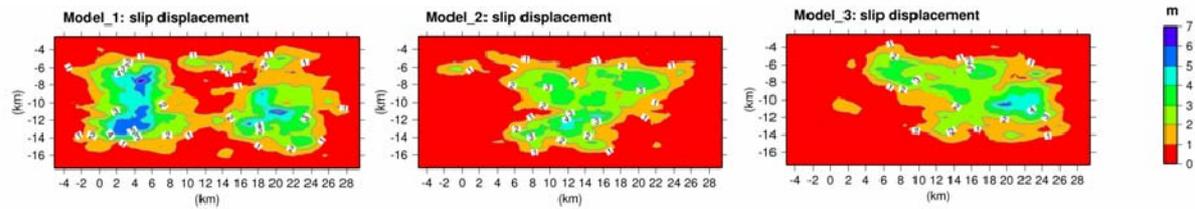


Figura 2: Distribuzioni di slip k-quadro utilizzate nello studio parametrico.

Funzione Sorgente. Per le simulazioni con COMPSYN, Sono state adottate 4 differenti forme analitiche di funzione sorgente (Figura 3): box-car, esponenziale, coseno e yoffe regolarizzata con $T_{acc}=0.225s$, dove T_{acc} è la durata della fase di accelerazione positiva (Tinti et al. 2005). La loro definizione sul piano di faglia richiede la conoscenza della distribuzione del *rise time* (durata locale della dislocazione), che per semplicità è assunto costante su tutta la faglia (*rise time*=1s). In questo modo il valore di picco della funzione sorgente e il suo valore integrale (ovvero lo slip) sono variabili sul piano di faglia.

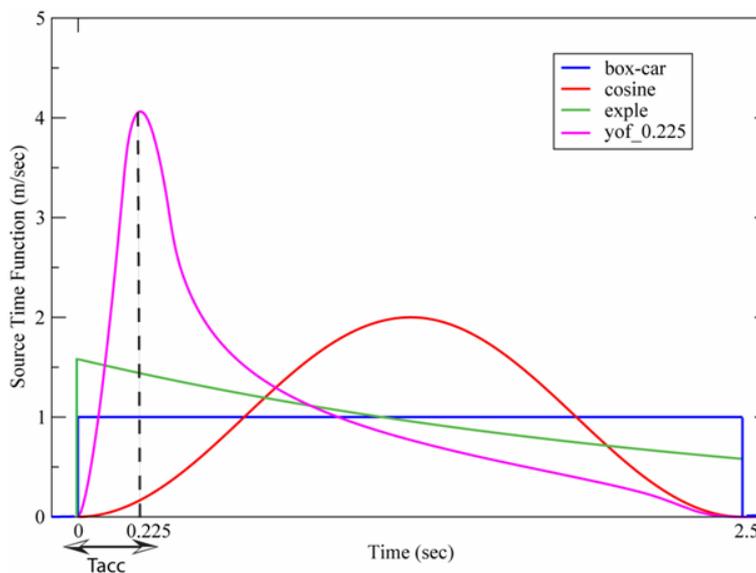


Figura 3. Forma funzionale delle funzioni sorgente utilizzate in questo studio.

Risultati

I 300 scenari generati hanno permesso di studiare l'effetto della variazione dei parametri cinematici sui parametri *ground-motion* (PGD, PGV, PGA) in tutte le stazioni accelerometriche considerate e alle 21 stazioni virtuali (Figura 1).

In Figura 4 sono riportati i valori di PGV dei 300 scenari (COMPSYN) e i PGA dei 45

scenari (DSM) simulati a tutte le 29 stazioni. Da questa figura si osserva una forte variabilità dei valori di PGV ai diversi siti, incluse le stazioni che si trovano alla stessa distanza dal piano di faglia (ad esempio per la stazione di Bagnoli e la sta_02, evidenziate da una box rossa) che mostrano una diversa variabilità dei parametri di *ground motion*.

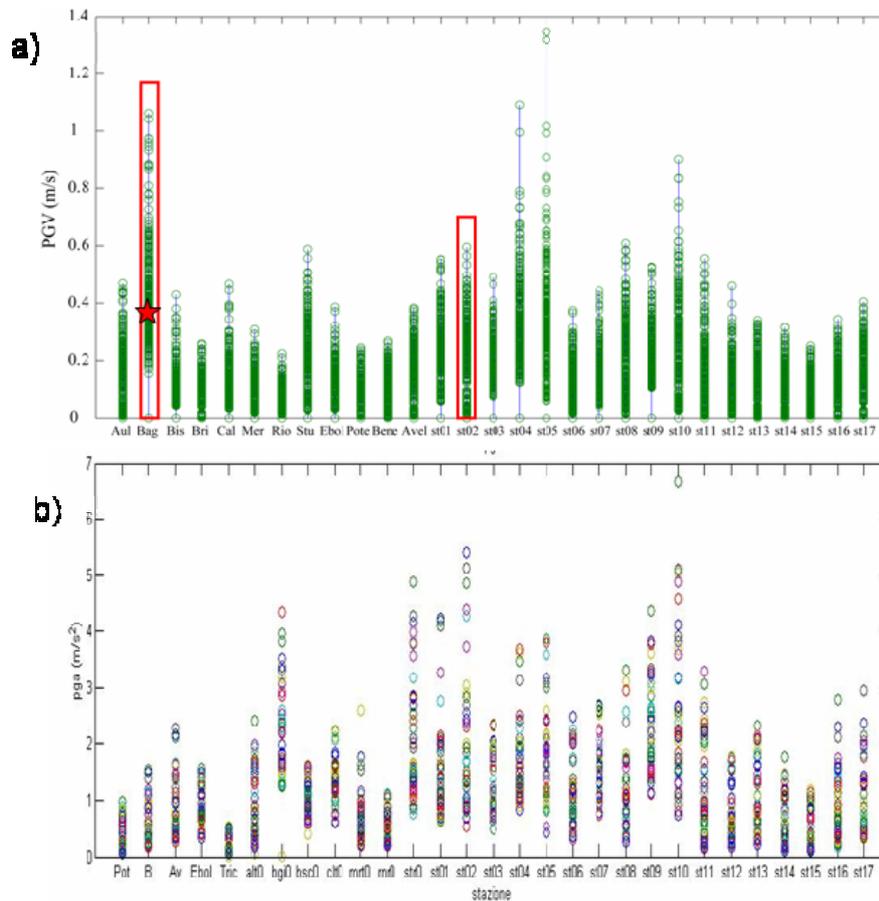


Figura 4: Variabilità di (a) PGV e (b) PGA (asse y) calcolata per tutti gli scenari in ogni singolo sito (asse x). La stella rossa rappresenta il valore di PGV realmente registrato durante l'evento a 0 secondi dell'Irpinia (1980).

Per poter studiare in dettaglio l'influenza dei singoli contributi o delle possibili combinazioni dei parametri cinematici sul moto simulato, è necessario applicare una tecnica di "deaggregazione". A partire dalla conoscenza delle distribuzioni dei picchi (PGA, PGV e PGD) ai singoli siti, questa tecnica permette evidenziare i diversi livelli di informazione attraverso:

- la suddivisione delle distribuzioni dei valori di picco in funzione dei singoli

parametri cinematici;

- l'individuazione di scenari che rispondano a determinate richieste (ad esempio scenari che producano parametri di *ground motion* superiori ad una data soglia oppure gli scenari con maggior numero di occorrenza) evidenziando i contributi delle combinazioni dei parametri cinematici;

- l'individuazione di scenari che soddisfino contemporaneamente più richieste (ad esempio scenari che producono i massimi di PGV a più stazioni oppure i massimi di PGV e PGD alla stessa stazione).

Di seguito sono riportati alcuni esempi dei risultati dell'analisi effettuate sulle distribuzioni dei parametri *ground motion*.

In Figura 5 e Figura 6 sono descritte le distribuzioni di PGV e PGD ai siti di Bagnoli e st_02. Gli istogrammi evidenziano come i singoli parametri cinematici contribuiscano in modo differente sia alla forma della distribuzione che ai valori di PGV e PGD calcolati per le due stazioni. In particolare, per ogni tipo di parametro cinematico (Vr, distribuzione di slip, punto di enucleazione, funzione sorgente) la palette di colori permette di distinguere gli effetti delle varie forme funzionali che ogni singolo parametro può assumere (si veda Appendice 2).

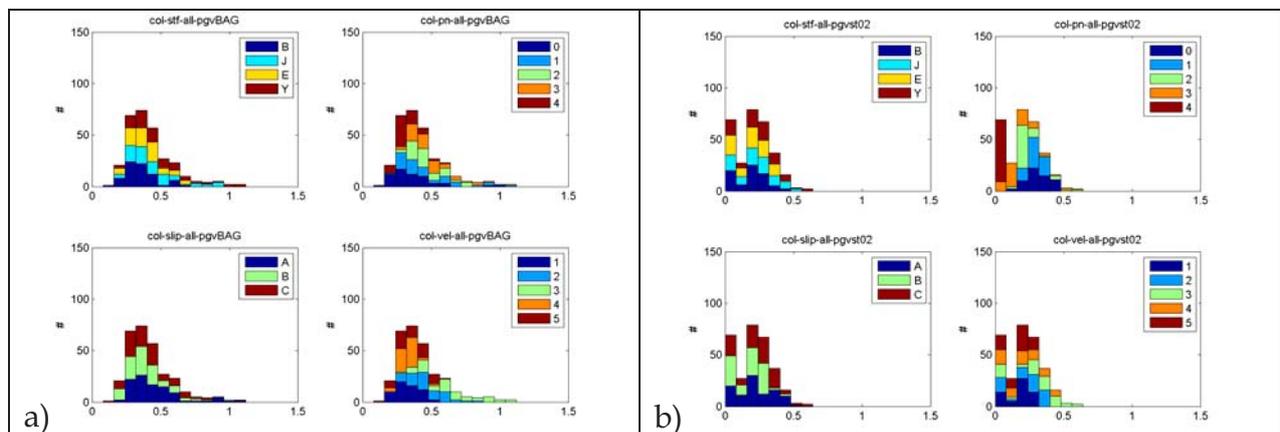


Figura 5: Distribuzione di PGV (m/s) alle stazioni di (a) BAG e (b) st_02. La palette di colori evidenzia i diversi contributi dei parametri cinematici (1-funzione sorgente; 2-punto di enucleazione; 3-distribuzione di slip; 4-velocità di rottura).

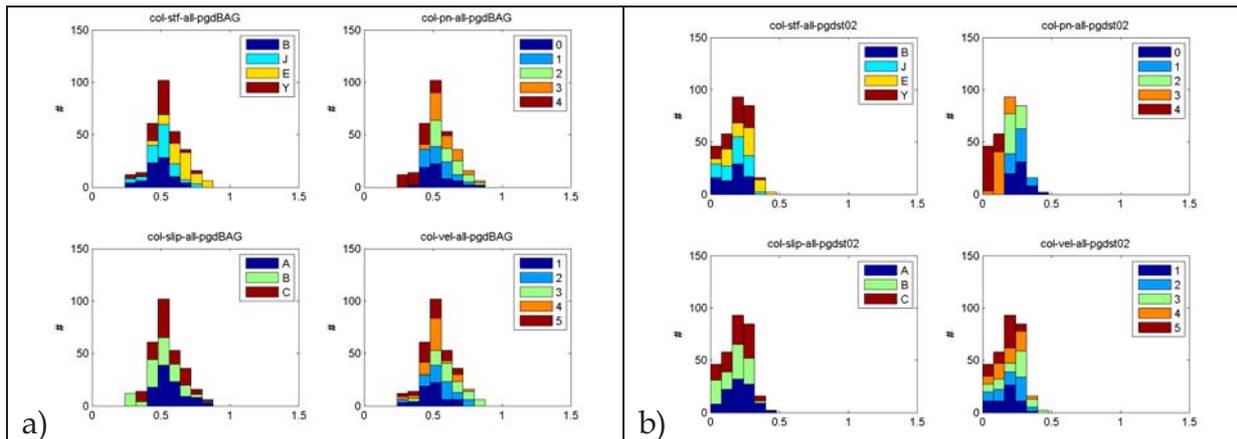


Figura 6: Distribuzione di PGD (m) alle stazioni di (a) BAG e (b) st_02. La palette di colori evidenzia i diversi contributi dei parametri cinematici (1-funzione sorgente; 2-punto di enucleazione; 3-distribuzione di slip; 4-velocità di rottura).

L’approccio adottato permette di selezionare, ad ogni singolo sito, scenari che soddisfino determinate richieste. In Figura 7 sono riportati il sottoinsieme degli scenari che producono valori di PGV in un dato intorno del massimo calcolato alla stazione sta_02 (0.39-0.59m/s). I quattro pannelli permettono di evidenziare i contributo dei singoli parametri cinematici. Ad esempio, se si guardano gli effetti della posizione del punto di enucleazione si osserva che i massimi valori di PGV alla stazione sta_02 sono dovuti soprattutto a pn0, che si trova all'estremità opposta della faglia (effetto di direttività). Per quanto riguarda l'effetto della velocità di rottura, il contributo predominante è dovuto alla velocità massima ($Vr3=90\% Vs$).

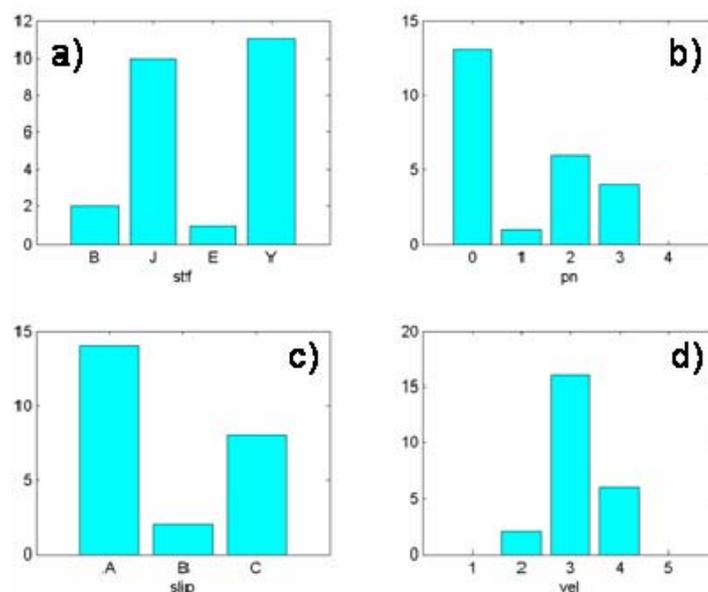


Figura 7: Distribuzioni del sottoinsieme di scenari definito in un intorno del massimo PGV a sta_02, differenziate per il contributo dei diversi parametri cinematici: a-funzione sorgente; b-punto di enucleazione; c-distribuzione di slip; d-velocità di rottura.

È possibile, inoltre, valutare il contributo combinato di tutte le possibili coppie di parametri alla distribuzione di PGV e PGD al singolo sito (per esempio distribuzione di slip e velocità di rottura, velocità di rottura e punto di enucleazione, funzione sorgente e punto di enucleazione, ecc.).

In Figura 8 sono mostrate le combinazioni di due parametri cinematici (distribuzione di slip e velocità di rottura) che contribuiscono al massimo valore di PGV e PGD al sito di Bagnoli. Si noti che gli scenari associati ad ogni combinazione dei due parametri possono avere diverse posizioni del punto di enucleazione e diverse funzioni sorgente. Nel caso in Figura solo il 5% degli scenari, caratterizzati da velocità di rottura $Vr3$ (Vr massima) e da diverse distribuzioni di slip, producono contemporaneamente massimo PGV e PGD. Tra questi, solo tre scenari hanno anche lo stesso punto di enucleazione e la stessa funzione sorgente:

scenario	funzione sorgente	punto di enucleazione	distribuzione di slip	velocità di rottura (Vr)
1	Coseno	3	A	3
2	Yoffe	3	A	3
3	Yoffe	3	C	3

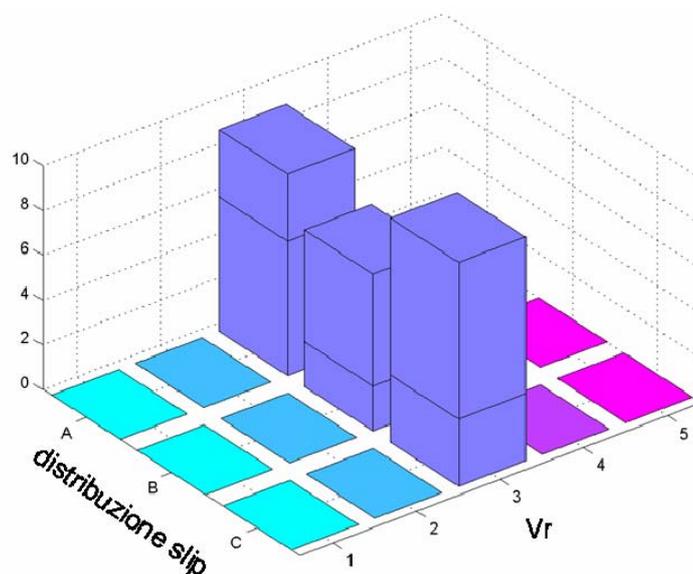


Figura 8: scenari che contribuiscono al valore massimo di PGV e PGD calcolata a Bagnoli. L'istogramma mette in evidenza i contributi di due parametri cinematici: la distribuzione di slip (A, B e C) e la velocità di rottura ($Vr1$, $Vr2$, $Vr3$, $Vr4$, $Vr5$).

Infine, un ulteriore livello di informazione è ottenibile con la selezione di scenari che

soddisfino contemporaneamente più richieste. Ad esempio, si può dedurre il numero di scenari che producono valori massimi di PGV in due o più stazioni.

In Figura 9 sono riportati il numero degli scenari che producono valori di PGV in un dato intorno del massimo alla stazione di sta_02 e Bagnoli, in funzione dell'effetto combinato della velocità di rottura e del punto di enucleazione. In questo caso gli scenari con identici parametri cinematici e che danno il massimo di PGV ad entrambe le stazioni risultano essere un totale di 6. In generale può verificarsi il caso che l'intersezione delle possibili richieste dia luogo all'insieme vuoto.

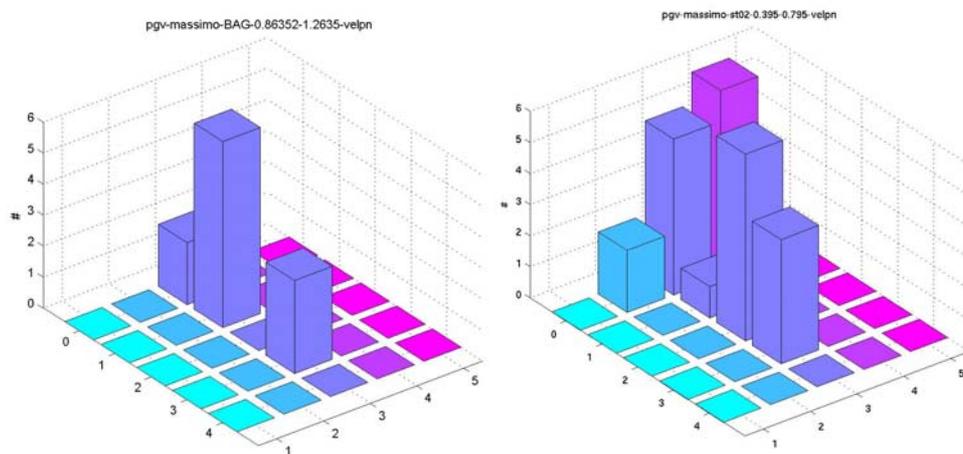


Figura 9: Distribuzioni del sottoinsieme di scenari definito in un intorno del massimo PGV a Bagnoli (0.86-1.06m/s) e a sta_02 (0.39-0.59m/s), in funzione dei parametri velocità di rottura e posizione del punto di enucleazione.