



MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITA' E DELLA RICERCA

Programmi di ricerca cofinanziati - Modello E Relazione scientifica conclusiva sui risultati di ricerca ottenuti - ANNO 2007 prot. 2007CR5K7M

1. Area Scientifico Disciplinare principale	<i>08: Ingegneria civile ed Architettura</i>
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	<i>FACCIOLI Ezio</i>
- Università	<i>Politecnico di MILANO</i>
- Facoltà	<i>Facoltà di INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE e TERRITORIALE</i>
- Dipartimento/Istituto	<i>Dip. INGEGNERIA STRUTTURALE</i>
3. Titolo del programma di ricerca	<i>PREDIZIONE DEL MOTO SISMICO E GENERAZIONE DI MAPPE DI SCUOTIMENTO IN PROSSIMITA' DELLA SORGENTE DI UN TERREMOTO</i>
4. Settore principale del Programma di Ricerca:	<i>ICAR/09</i>
5. Costo originale del Programma:	<i>430.000 €</i>
6. Quota Cofinanziamento MIUR:	<i>180.600 €</i>
7. Quota Cofinanziamento Ateneo:	<i>77.811 €</i>
8. Finanziamento totale:	<i>258.411 €</i>
9. Durata:	<i>24 mesi</i>

10. Obiettivo della ricerca eseguita

Il progetto si è proposto di quantificare gli effetti del terremoto entro brevi distanze dalla faglia sismogenetica mediante un approccio rigoroso e innovativo, validandolo mediante dati strumentali e osservazioni macrosismiche. L'approccio ha compreso un arco di tematiche che va dalla caratterizzazione geologica/geofisica di siti campione, all'analisi dei dati strumentali e macrosismici, ai calcoli di propagazione con metodi numerici avanzati.

L'attenzione è stata focalizzata in una regione di studio compresa nell'alta Valle del Tagliamento, con particolare riguardo alle seguenti aree:

- Conoide di Gemona;*
- Bacino di Tarcento;*
- Piana di Osoppo;*
- Buia.*

Con riferimento a tali aree, nell'ambito del progetto sono stati perseguiti i seguenti obiettivi:

Indagini geognostiche in sito (Sotto-Progetto SP2): raccogliere ed organizzare le informazioni esistenti (dati in pozzo, sezioni geologiche, gravimetrie, ..) ed acquisirne di nuove con opportune campagne di indagini in sito, ai fini di definire opportuni modelli delle configurazioni geologiche e morfologiche locali, utili per la quantificazione della loro risposta sismica.

Monitoraggio sismico (SP3): installare reti accelerometriche temporanee, complementari rispetto a strumenti permanenti della Rete Accelerometrica Friulana (RAF) e di quella Nazionale (RAF), con lo scopo di analizzare strumentalmente eventuali fenomeni di amplificazione della risposta sismica locale, con riferimento alla conoide di Gemona ed al bacino di Tarcento.

Caratterizzazione delle potenziali sorgenti sismogenetiche sulla base di dati strumentali e macrosismici (SP4): compilare le principali sorgenti sismiche dell'area in studio e, sulla base delle informazioni geologiche e strumentali disponibili, completarne la definizione dei parametri cinematici, con particolare riferimento alle faglie sorgenti della sequenza sismica avvenuta in Friuli tra Maggio e Settembre 1976.

Simulazioni numeriche (SP5): compiere simulazioni numeriche a diverso livello di complessità per alcune tra le aree in studio, dal caso 1D a quello 3D, per valutare l'effetto di diversi tipi di modellazione numerica sulla risposta sismica del suolo in condizioni di campo vicino ed in corrispondenza di configurazioni geo-morfologiche complesse.

11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Descrizione della ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Sulla base degli obiettivi proposti, la ricerca ha prodotto una notevole quantità di risultati, sia sperimentali che numerici, riassunti nei Deliverable pubblicati nel sito Internet del progetto <http://rtweb.units.it/prin07/home.htm>. Rimandando a tali Deliverable per una presentazione più approfondita, se ne dà nel seguito una breve sintesi.

Nell'ambito del progetto è stato inoltre dato ampio spazio all'implementazione di nuovi algoritmi nel codice di calcolo GeoELSE per la propagazione delle onde sismiche in configurazioni geologiche complesse 3D ed alla creazione di un sito internet (<http://geoelse.stru.polimi.it>) che ne contiene diversi esempi applicativi, anche legati alle attività svolte in questo progetto.

Deliverable D1 - Caratterizzazione geologica/geofisica dei siti campione del progetto

Questa attività è stata rivolta alla caratterizzazione sismica dei siti selezionati all'interno del progetto per la simulazione numerica del moto del suolo indotto dal sisma. In particolare la ricerca si è focalizzata sui modelli di velocità delle onde di taglio, che sono di primaria importanza per le simulazioni numeriche. A questo proposito due diversi approcci sono stati seguiti: metodi per onde superficiali e profili sismici verticali basati sulla propagazione di onde di volume (VSP). Da una parte (Politecnico di Torino - UR3) si è proceduto alla caratterizzazione sismica del bacino di Tarcento e di due siti a Gemona del Friuli utilizzando il metodo delle onde sismiche di superficie. La caratterizzazione del bacino di Tarcento è stata finalizzata a ricostruire un modello 3D di velocità delle onde di taglio adatto per le simulazioni numeriche. A questo proposito un algoritmo per l'inversione lateralmente vincolata è stato sviluppato e testato su serie di dati indipendenti. Successivamente, il codice di inversione è stato utilizzato per l'analisi dei dati di onde superficiali acquisiti in 16 siti nel comune di Tarcento. Il risultato finale di questa attività è un modello tridimensionale di velocità delle onde di taglio (Figura 1) ottenuto per interpolazione lineare dell'insieme di profili delle onde di taglio. Tale modello è internamente coerente e conforme alle informazioni a-priori disponibili, quali sondaggi, risultati di misure cross-hole e conformazione del bordo valle. Inoltre sono state costruite due sezioni trasversali 2D in modo da consentire una valutazione numerica semplificata della risposta del bacino. Dall'altra parte (OGS - UR4), è stato perseguito l'obiettivo di migliorare la caratterizzazione geologico-geofisica della zona dell'Alta Valle del Tagliamento (Campo di Osoppo). Al fine di ottenere nuove informazioni sulla geometria e sulle velocità sismiche, sono state condotte prove sismiche di superficie ed in foro. L'obiettivo finale di questa attività è stato quello di definire un modello geofisico affidabile come input per i modelli numerici di previsione del moto sismico 2D-3D. Altre attività di caratterizzazione sismica si sono concentrate sui siti dove sono state installate stazioni accelerometriche nel passato o specificamente per il presente progetto (due a Gemona e uno a Tarcento). Tali prove avevano lo scopo di fornire profili di velocità 1D delle onde di taglio da utilizzare per l'interpretazione dei dati accelerometrici raccolti durante il monitoraggio di sismi e microtemori. I dati relativi alle onde di superficie raccolti in questi siti sono stati analizzati utilizzando un approccio MonteCarlo per fornire profili della velocità delle onde di taglio. Inoltre, è stato sviluppato un nuovo algoritmo per l'inversione congiunta delle onde di superficie e dei tempi di percorrenza a partire dalla sismica a rifrazione in onde P. Tale approccio è stato applicato a questi dati per migliorare l'affidabilità dei risultati.

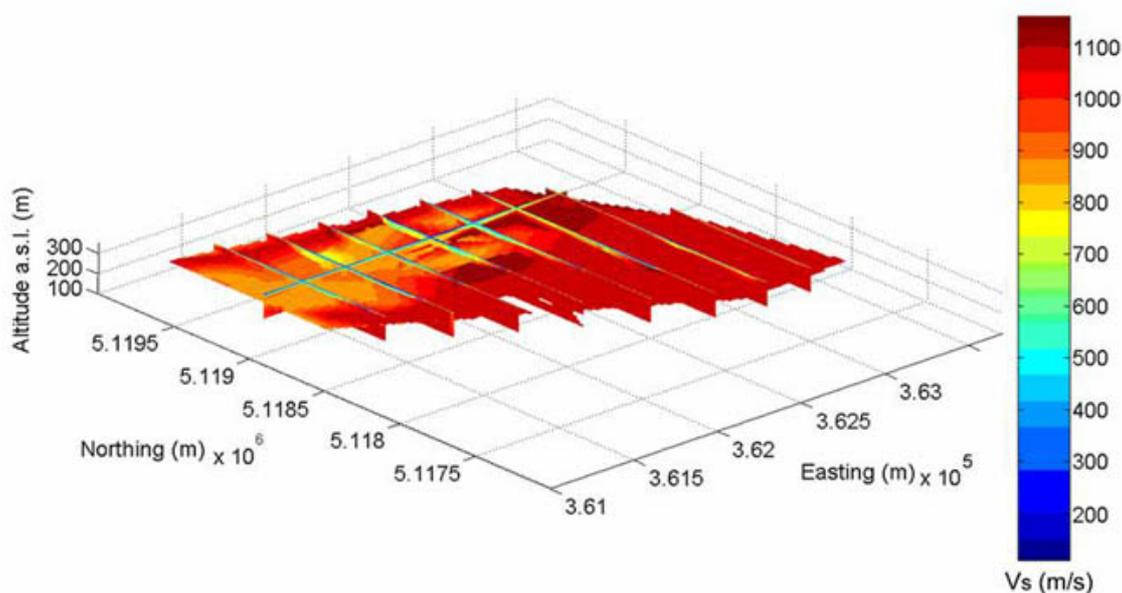


Figura 1. Modello 3D della velocità delle onde di taglio del bacino di Tarcento

Deliverable D2 - Descrizione delle micro-reti accelerometriche installate nel progetto e raccolta delle registrazioni accelerometriche rilevanti

Le UR1 (Politecnico di Milano) e UR2 (Università di Trieste) hanno condotto congiuntamente, con inizio in settembre 2008 e fine in aprile 2010, un'attività di monitoraggio sismico e di interpretazione dei dati a Tarcento e a Gemona del Friuli.

A Tarcento sono stati installati 3 accelerografi digitali Kinematics K2, nei siti Palazzetto dello Sport (TSH), Istituto Scolastico Comprensivo (TSC) e chiesa di San Biagio (TSB), allineati lungo l'asse EW della conca tarcentina. La posizione delle tre stazioni accelerometriche è stata decisa sulla base della geometria 3D, al fine di monitorare la risposta sismica in funzione delle principali variazioni geometriche del substrato roccioso. La profondità del substrato alla stazione TSH, assunto come sito di riferimento, non supera 5 m.

Le 3 stazioni di Tarcento hanno chiaramente registrato ben 142 terremoti nel periodo in esame, in maggioranza eventi deboli regionali (Figura 2), ma comprendendo anche la scossa principale dell'Aquila del 6.4.2009 e la replica più energetica, nonché i terremoti del Frignano (Parma) del 23.12.2008.

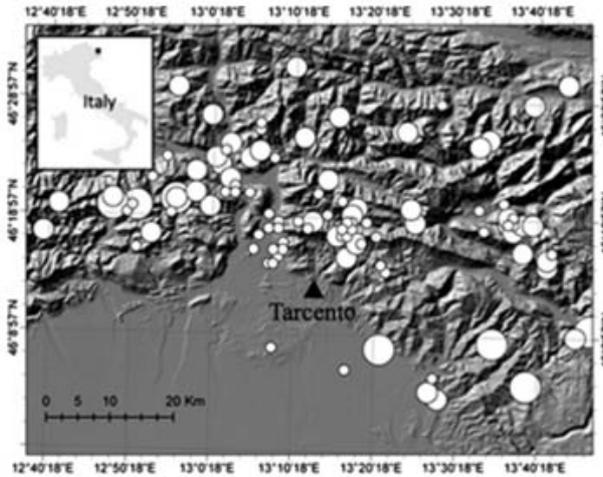


Figura 2. Distribuzione regionale degli epicentri (cerchi bianchi di dimensione proporzionale alla magnitudo) delle scosse registrate dalla microrete di Tarcento, di magnitudo compresa tra 0.7 e 3.6, e distanza ≤ 50 km dalla stazione TSH.

L'analisi del contenuto spettrale delle migliori registrazioni ha permesso, attraverso il metodo dei rapporti spettrali H/V (singola stazione) e dei rapporti spettrali standard (SSR), di individuare evidenti fenomeni di amplificazione sismica locale nei siti di registrazione, come evidenziato in Figura 3.

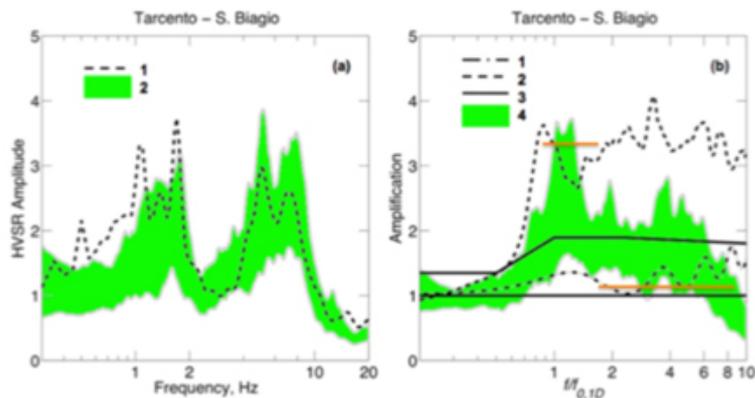


Figura 3. (a) Stazione TSB: 1 = rapporto spettrale H/V medio del rumore microsismico, 2 = H/V medio ± 1 sqm da eventi locali e regionali; (b) 1 = funzione teorica 1D di amplificazione, in funzione della frequenza normalizzata rispetto a $f_0 = 1.4$ Hz (freq. di risonanza 1D del profilo alluvionale in corrispondenza del suo max spessore); 2 = amplificazione media degli spettri di Fourier da simulazioni 2D, nella zona centrale di una valle-modello tratta dal progetto Sismoalp (v. Cauzzi et al. 2010); 3 = limiti di amplificazione degli spettri di risposta su suolo B nel zona centrale della conca, secondo un criterio semplificato (Faccioli et al. 2010); 4 = SSR medio TSB/TSH ± 1 sqm. I tratti orizzontali in arancio indicano l'amplificazione media di spettri di risposta predetta in Brambati and Faccioli (1980) sulla base di simulazioni FEM 2D.

Per Tarcento, le registrazioni di scosse deboli confermano le indicazioni principali dello studio di Brambati e Faccioli (1980), sull'influenza del profilo stratigrafico locale e delle proprietà meccaniche dei materiali sulla risposta sismica locale. Inoltre, per quanto riguarda effetti di sito complessi (2D/3D), l'analisi condotta da Cauzzi et al. (2010) ha mostrato che i criteri semplificati disponibili per stimare l'amplificazione sismica nelle valli alluvionali (riassunti in Faccioli et al. 2010) permettono di stimare qualitativamente i livelli medi di amplificazione degli spettri di Fourier (SSR) nella conca di Tarcento e, in modo decisamente soddisfacente, gli intervalli di frequenza significativi.

A Gemona del Friuli, due stazioni accelerometriche (GEING e GERH), dotate di accelerografi neozelandesi CUSP-3 con sensori triassiali interni MEMS, sono state affiancate alle tre della rete permanente del Friuli (RAF), una delle quali si trova su roccia con funzione di stazione di riferimento (GEPF).

La micro-rete a Gemona ha fornito, nel periodo in esame, un numero totale di 15 registrazioni di buona qualità. I risultati delle amplificazioni ottenuti con le tecniche HVSr e SSR mostrano come il conoide risponda in modo diverso a seconda dell'azimut dell'evento che lo scuote, a prova della struttura 3D complessa del basamento del conoide sedimentario.

Le forma d'onda registrate dalle micro-rete accelerometriche sono state raccolte in un database, pubblicato sul sito del progetto (<http://rtweb.uniis.it/prin07/home.htm>).

Deliverable D3 - Caratterizzazione delle potenziali sorgenti sismogenetiche in Friuli sulla base di dati strumentali e macrosismici

In questo rapporto sono presentati gli studi compiuti dalla UR2 (Università di Trieste) e dalla UR4 (OGS) per la caratterizzazione delle faglie generatrici, e la definizione dei relativi parametri cinematici, del terremoto principale e delle maggiori repliche sismiche ($M > 5$) della sequenza sismica friulana del maggio-settembre 1976.

Sebbene molti studi siano dedicati alla scossa principale, solo di recente modelli di faglia estesa basati su considerazioni geologiche (Galadini et al., 2005; Burrato et al., 2008) sono stati proposti per le repliche principali. Il presente studio si è proposto di modellare le faglie estese delle principali scosse del settembre 1976, calcolando sismogrammi sintetici per i diversi modelli di faglia e relative nucleazioni proposti in letteratura.

La distribuzione di sismicità al seguito di ognuno di questi eventi ha fornito ulteriori indicazioni riguardo all'estensione areale della faglia e sulla propagazione della rottura. Circa 9,000 sismogrammi sono stati calcolati per i modelli proposti, adottando la tecnica della riflettività (Kennett, 1983) per una frequenza limite di 1 Hz. In

particolare, si è adottato una procedura di tipo “trial and error” per trovare la soluzione migliore, con il misfit minore tra valori osservati e calcolati di accelerazione del suolo di picco (PGA). Le soluzioni migliori sono state ulteriormente selezionate in base alle conoscenze di tettonica dell'area. I quattro modelli migliori, illustrati in Figura 4, sembrano ben correlati al sistema di faglie Barcis - Staro selo e a faglie immediatamente a nord di essa. L'evoluzione spazio temporale della sequenza evidenzia una progressiva migrazione da est ad ovest delle sorgenti. I parametri relativi ai quattro modelli di faglia sono riportati in Tabella 1. Il modello strutturale delle Alpi Carniche e Giulie di più recente elaborazione descrive linee strutturali estrapolabili in profondità, alcune delle quali offrono buona rispondenza con i dati sismologici. Ciascuno degli eventi in esame trova collocazione sia come meccanismo che come profondità nel sistema tettonico proposto, che inquadra esaurientemente anche la successione degli eventi in termini di propagazione dello sforzo. Ancora in discussione è il fatto che le maggiori faglie siano radicate nel basamento o che, invece, ci si trovi di fronte a una catena di copertura, scollata a livello delle evaporiti triassiche. Il problema non ha comunque sostanziali ripercussioni, data la profondità degli eventi sismici, sulla individuazione delle faglie capaci. I principali risultati di tale lavoro sono descritti in dettaglio in Moratto et al. (2010), in via di pubblicazione sul Bulletin of Seismological Society of America.

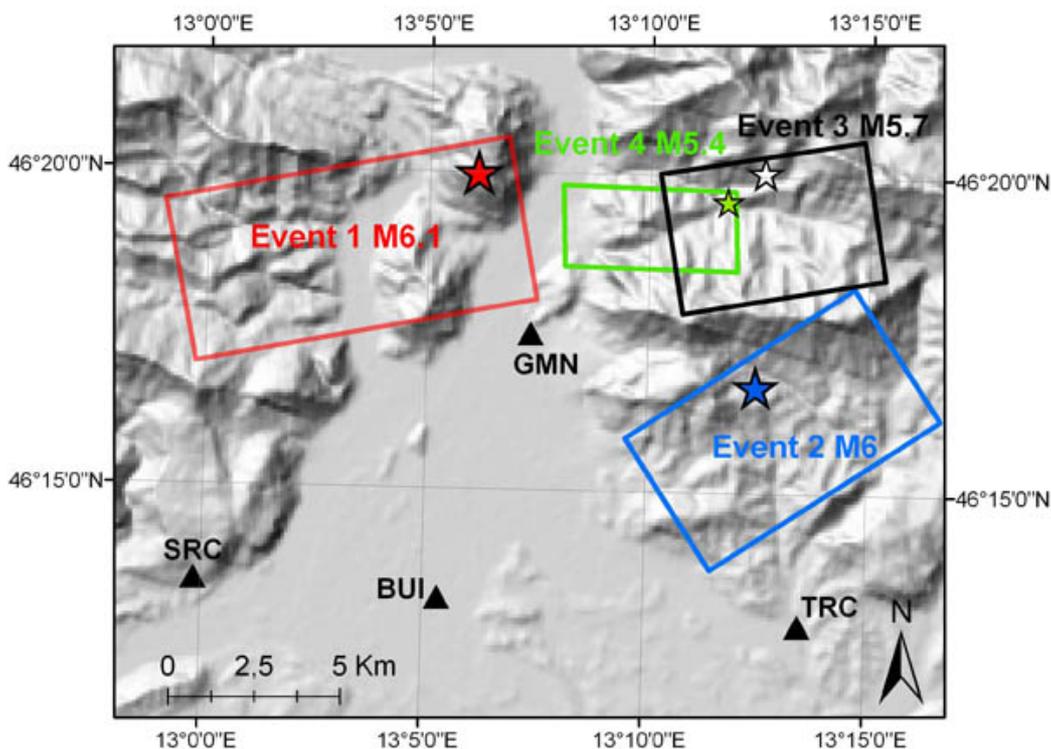


Figura 4. Modelli di sorgente per i 4 terremoti della sequenza friulana del Settembre 1976.

Tabella 1. Principali parametri cinematici relativi alle sorgenti sismogenetiche del Settembre 1976.

	September 11 16:31	September 11 16:35	September 15 03:15	September 15 09:21
Epicenter longitude	13.20	13.20	13.20	13.12
Epicenter latitude	46.33	46.34	46.27	46.34
Top of the fault depth	8.0 km	2.0 km	4 km	6.5 km
Fault length	5.0 km	6.0 km	8.0 km	10 km
Fault width	3.0 km	4.5 km	5.5 km	5.5 km
Magnitude	5.4	5.7	6.0	6.1
Strike	271°	260°	236°	260°
Dip	38°	24°	34°	43°
Rake	116°	91°	110°	110°
Hypocenter depth	9.8 km	3.8 km	7.0 km	10.0 km
Rupture propagation	Unilateral E-W	Unilateral E-W	Bilateral	Unilateral E-W
Seismic moment distr.	k ₁	k _{2g}	k ₂	k ₁
Total misfit	0.4919	0.3993	0.2797	0.3748

Deliverable D4 - Simulazioni numeriche in condizioni di campo vicino

- L'attività di ricerca, svolta dalla UR1 Politecnico di Milano in collaborazione con la UR4 OGS di Trieste, si è principalmente concentrata sui seguenti temi:
- stato dell'arte dei principali metodi per la previsione del moto sismico in condizioni di campo vicino, con esempi applicativi di metodi empirici (relazioni di attenuazione), stocastici, delle funzioni di green empiriche, deterministici (e.g. Hisada, 1994) e ibridi (stocastico + deterministico).
 - Analisi delle registrazioni accelerometriche per gli eventi della sequenza sismica friulana del maggio-settembre 1976 e verifica dell'applicabilità di relazioni di attenuazione alla predizione dei parametri di scuotimento sismico in prossimità della faglia generatrice del terremoto.
 - Potenziamento del codice di calcolo ad elementi spettrali GeoELSE con strumenti di calcolo rivolti ad una trattazione generale della sorgente sismica, in termini di: i) implementazione della procedura di riduzione dei domini "Domain Reduction Method" (Bielak, 2003; Faccioli, 2005) in architetture di calcolo parallelo per l'analisi di problemi di propagazione di onde piane ad angolo di incidenza arbitrario; ii) modellazione cinematica di sorgenti sismiche arbitrariamente complesse, con la possibilità di definire in maniera semi-automatica una distribuzione realistica di scorrimento sulla faglia, sulla base dei più recenti studi di inversione sulla sorgente sismica (vedi Figura 5); iii) definizione dei parametri di sorgente, quali il tempo di scorrimento, la velocità di rottura e l'angolo di scorrimento, in termini di distribuzioni stocastiche, che contribuiscono ad eccitare le componenti del moto ad alta frequenza ($>1-2$ Hz).
 - Esecuzione di simulazioni numeriche 3D della risposta sismica dell'alta valle del Tagliamento durante il terremoto del 15 Sett 1976 (MW 6.1, 09.21 GMT) e generazione di mappe di scuotimento nella zona epicentrale del terremoto.
 - Confronto dei risultati ottenuti con diversi approcci numerici per lo stesso scenario di cui al punto (d), in collaborazione con la UR4 - OGS di Trieste: i) simulazioni numeriche 1D in corrispondenza di 47 siti all'interno della piana del Tagliamento, utilizzando come input al substrato roccioso affiorante la registrazione alla stazione di San Rocco; ii) simulazioni 1D, come al punto precedente, ma con input su roccia affiorante dato da simulazioni 3D (GeoELSE) a banda larga (0-20 Hz), che includano un modello 3D della sorgente e del cammino di propagazione al sito; iii) simulazioni 3D con GeoELSE ($f < 2.5$ Hz), che comprendano anche un modello semplificato della piana del Tagliamento, messo a disposizione dai partner del progetto (Deliverable D1), oltre alla modellazione della sorgente sismica e del cammino di propagazione sorgente-sito.
 - Publicazione dei principali risultati delle simulazioni numeriche (mappe di scuotimento e animazioni) sul sito internet di GeoELSE: <http://geoelse.stru.polimi.it/>.

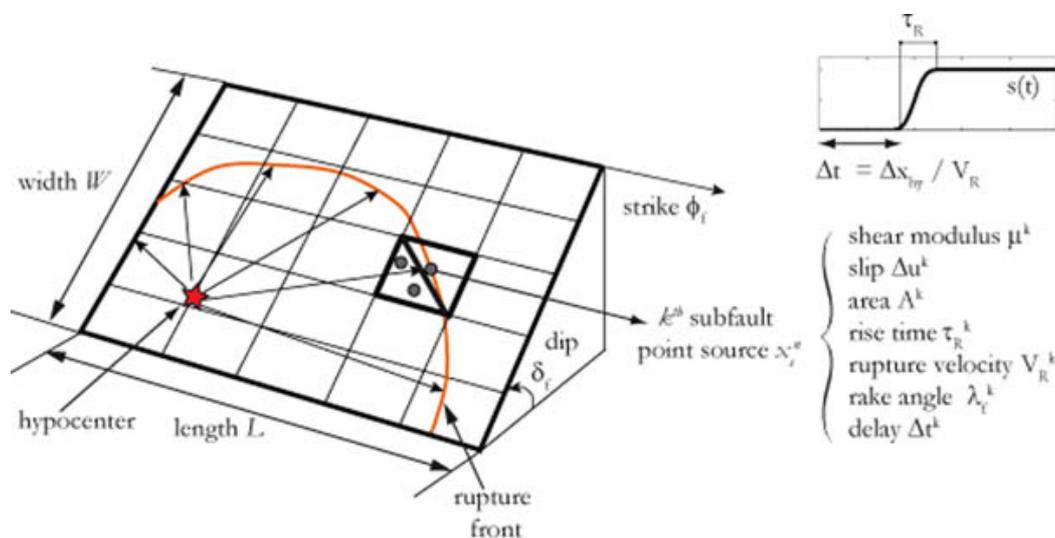


Figura 5. Parametri cinematici per la definizione di una sorgente sismica estesa in GeoELSE

Sulla base delle indagini in sito su numerosi pozzi dell'Alta Valle del Tagliamento (Deliverable D1) e della ricostruzione dei meccanismi cinematici delle faglie generatrici degli eventi principali della sequenza sismica friulana del maggio-settembre 1976 (Deliverable D3), è stato costruito un modello numerico 3D ad elementi spettrali per la simulazione tramite GeoELSE della risposta sismica della valle durante il terremoto del 15 Sett 1976 (ore 09.21 GMT), MW 6.1. La Figura 6 illustra le principali caratteristiche del modello numerico adottato per le simulazioni numeriche 3D. La griglia di calcolo (Figura 6a) ricopre un'area di circa $53 \times 57 \times 14.4$ km³, per un totale di circa 31.6 milioni di nodi (a grado spettrale 4), ed include, da un parte, un modello cinematico della sorgente sismica, caratterizzato dalla distribuzione di scorrimento e dalla storia temporale mostrate in Figura 6b, e, dall'altra, un modello semplificato omogeneo dei depositi alluvionali dell'alta valle del Tagliamento (Figura 6c).

I risultati delle simulazioni 3D sono stati confrontati con le registrazioni accelerometriche disponibili. I confronti mostrano un ragionevole accordo tra le forme d'onda simulate e registrate, nonostante alcune componenti siano notevolmente sovrastimate dalle simulazioni, specialmente a San Rocco (SRC0) e Forgaria (FRC). Il motivo è probabilmente da ricercarsi in una definizione dei parametri cinematici della sorgente sismica ancora da perfezionare.

In risposta agli obiettivi del progetto di ricerca, le simulazioni hanno permesso di produrre mappe di scuotimento del suolo nella zona epicentrale del terremoto. A titolo esemplificativo, in Figura 7 viene illustrata la mappa di velocità di picco del moto del suolo, nella componente normale alla faglia, all'interno della valle del Tagliamento. Risulta evidente che il campo d'onda simulate risente di marcati effetti direzionali con massimi valori di intensità, di circa 80 cm/s, concentrati lungo la direttrice sud-ovest che unisce l'epicentro con la stazione di SRC0.

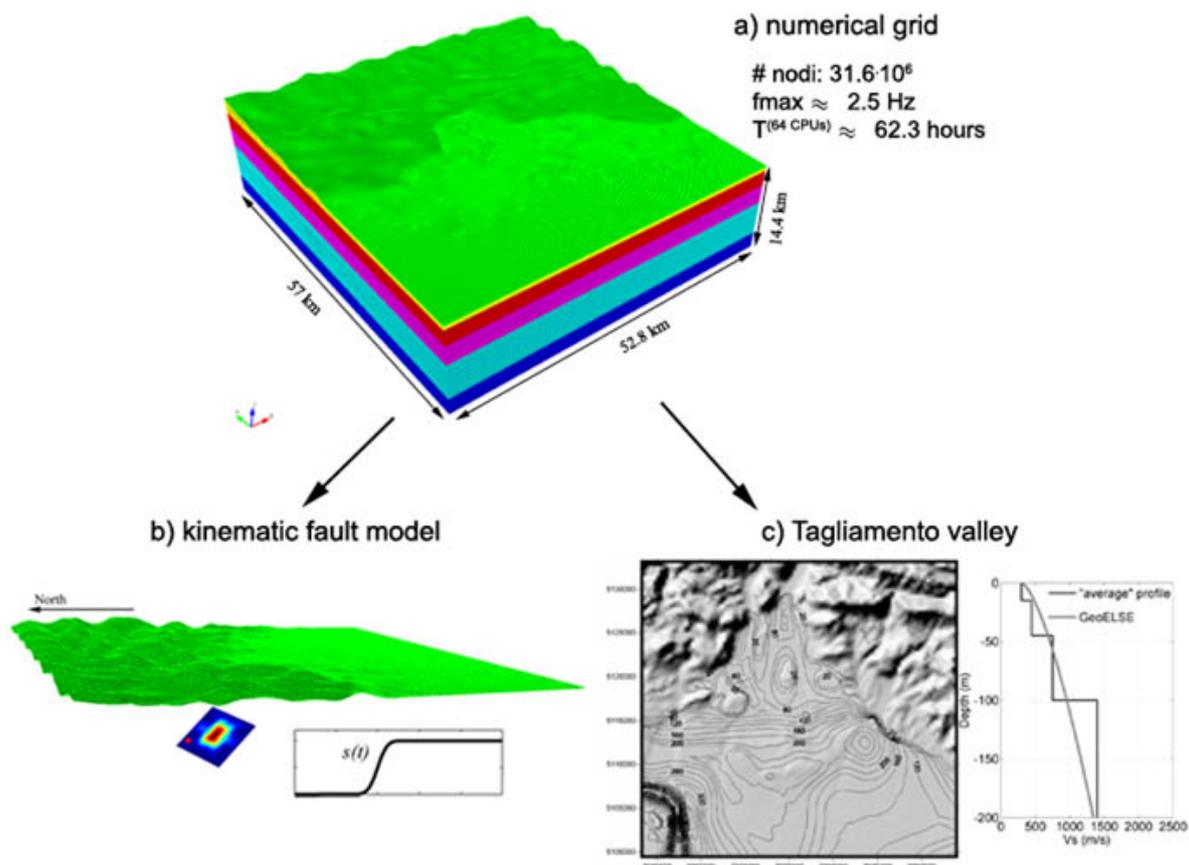


Figura 6. Modello numerico ad elementi spettrali dell'alta valle del Tagliamento, adottato per l'esecuzione delle simulazioni numeriche 3D con GeoELSE: a) griglia di calcolo; b) modello cinematico della sorgente sismica del 15 Sett. 1976 (MW 6.1); c) modello dei depositi alluvionali dell'alta valle del Tagliamento.

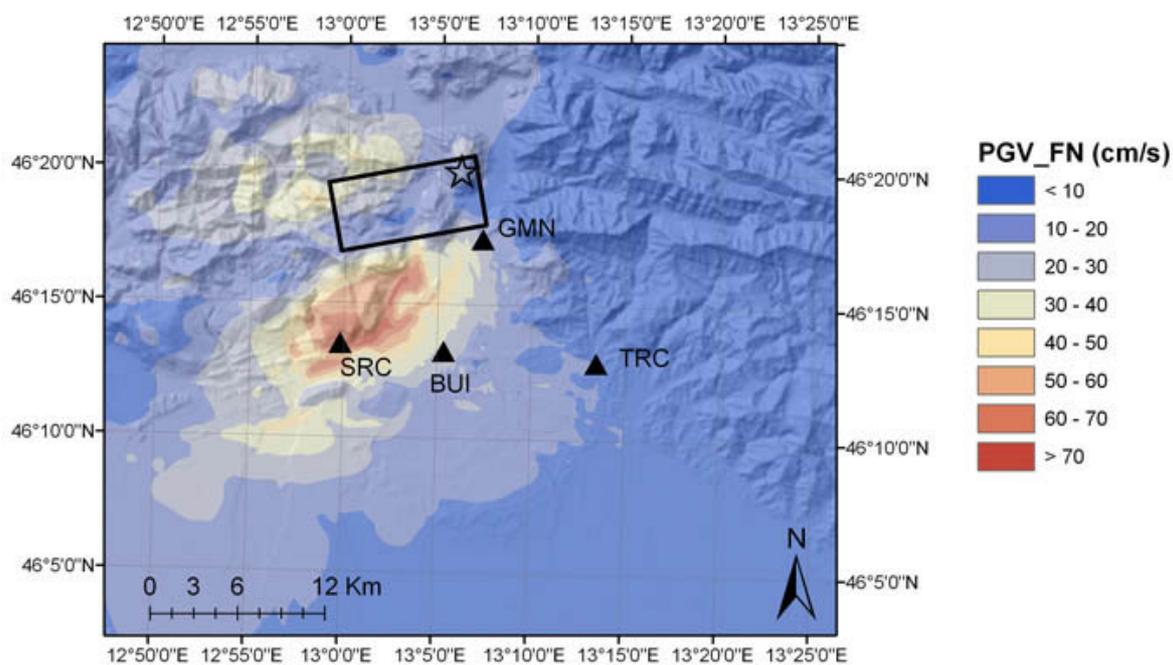


Figura 7. Mappa di velocità di picco del moto del suolo, nella componente normale alla faglia (azimuth = 260°), dalle simulazioni numeriche.

Deliverable D5 - Risposta sismica della stazione accelerometrica di Buia (Friuli) in campo vicino durante la sequenza sismica del Settembre 1976

Le registrazioni della stazione accelerometrica di Buia (BUI), durante le 4 scosse (M 5.2 - 6) della sequenza sismica del Settembre 1976, forniscono un esempio interessante di effetti di sito complessi che influenzano la risposta sismica locale. In due casi (11/9/76 16:35 componente NS; 15/9/76 09:21 componente EW), le registrazioni della stazione - 47 m di sedimenti alluvionali della valle del Tagliamento - mostrano effetti anomali. Nel primo caso, una forte amplificazione quasi "monocromatica" fra 1 e 2 Hz. Nel secondo, in quasi tutto il range di frequenze, le ampiezze su alluvione sono nettamente inferiori rispetto alla stazione di riferimento su roccia (S. Rocco). Il primo caso non ha ancora trovato spiegazione convincente. Il secondo è un chiaro effetto di sorgente, causa i differenti back-azimuth dei due accelerometri rispetto alla sorgente (Buia è in un minimo di radiazione S).

La risposta della stazione di BUI è stata valutata tramite analisi convenzionali 1D sia allo scopo di comprendere meglio la sensitività a diversi gradi di dettaglio dei modelli del pacchetto alluvionale (utile anche per le modellazioni 3D), sia per verificare l'accuratezza di metodi ingegneristici di previsione del moto sismico in campo vicino. Abbiamo adottato approcci: i) lineari, ii) lineari-equivalenti, e iii) non lineari. In aggiunta alle registrazioni delle scosse sismiche del Settembre 1976, sono state usate anche registrazioni di rumore e di eventi sismici deboli. Inoltre, la modellazione 1D della risposta sismica di BUI è stata studiata con particolare attenzione ai seguenti aspetti: i) soggettività nel ricavare modelli 1D, e ii) confronto con le attuali norme sismiche.

Il lavoro ha mostrato che un semplice modello 1D, in condizioni lineari, supportato da una buona conoscenza della velocità dei terreni, è in grado di riprodurre le frequenze di pseudo-risonanza osservata ma non i picchi di amplificazione (vedi Figura 8). Dall'altra parte, modelli non lineari riproducono con maggiore accuratezza i picchi di amplificazione ma non riescono a cogliere con precisione le relative frequenze. La risposta agli eventi deboli è più stabile rispetto ai 4 eventi forti del settembre '76.

Lo studio ha messo in evidenza come, nella pratica ingegneristica, approcci semplificati, basati sulla modellazione 1D della risposta sismica locale e sull'ipotesi di incidenza di onde piane verticali, non riescano a riprodurre tutta la complessità del moto osservato, specialmente in condizioni di campo vicino.

La disaggregazione dell'hazard conferma che i 4 eventi forti citati rappresentano l'hazard del sito: quindi, anche se nel '76 gli effetti di sorgente sono stati forti, gli spettri di normativa si sono dimostrati sufficientemente cautelativi.

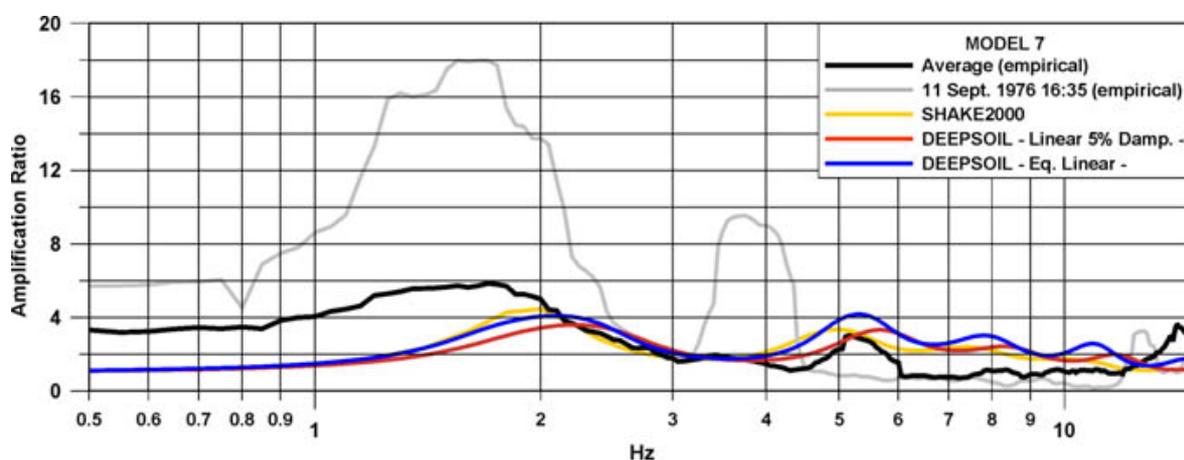


Figura 8. Confronto fra la funzione di amplificazione empirica di BUI/SRC (media di 5 registrazioni) con quella numerica, ottenuta da diversi modelli 1D sia lineari sia lineari-equivalenti.

Bibliografia

Bielak, J., Loukakis, K., Hisada, Y., and Yoshimura, C. (2003). Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, part I: Theory. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93(2):817-824.

Brambati A. e E. Faccioli (1980). Studio di micro zonizzazione sismica dell'area di Tarcento. Edito da Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Università degli Studi di Trieste e Politecnico di Milano, Trieste.

Burrato, P., Poli, M.E., Vannoli, P., Zanferrari, A., Basili, R., Galadini, F., 2008. Sources of Mw 5+ earthquakes in North-eastern Italy and western Slovenia: an updated view based on geological and seismological evidence. *Tectonophysics* 453, 157-176.

Cauzzi C., Faccioli E., e G. Costa (2010). 1D and 2D site amplification effects at Tarcento (Friuli, NE Italy), 30 years later. *J. of Seismology*, DOI 10.1007/s10950-010-9202-y

Faccioli E., Vanini M., Villani M., Cauzzi C., e C. Smerzini (2010). Mapping seismic hazard to account for basin amplification effects, *Proc. 9th Internatl. Workshop on Seismic Microzonation and Risk Reduction*, DVD, 21st-24th February, 2010, Cuernavaca, Mexico.

Faccioli, E., Vanini, M., Paolucci, R., and Stupazzini, M. (2005). Reply to "Comment on 'Domain Reduction Method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions'". *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(2):770-773.

Galadini, F., Poli, M.E., Zanferrari, A., 2005. Seismogenic sources potentially responsible for earthquakes with M6 in the eastern Southern Alps (Thiene-Udine sector, NE Italy). *Geophys. J. Int.* 161, 739-762.

Hisada, Y. (1994). An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84(5):1456-1472.

Kennett, B.L.N., 1983. *Seismic wave propagation in stratified media*. Cambridge University press.

Moratto, L., Suhadolc, P., Costa, G., 2010. Modelling the Finite-fault Parameters of the Four M>5 September 1976 Friuli (NE Italy) Earthquakes. Submitted to BSSA.

12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

Pur con l'ambizione di un programma ampio, sia in termini di indagini geonostiche in sito, che di monitoraggio con reti accelerometriche temporanee, che di simulazioni numeriche avanzate, il programma di ricerca non ha riscontrato problemi particolari.

Durante lo svolgimento del progetto, l'occorrenza del terremoto dell'Aquila ha da una parte ritardato o modificato lo sviluppo di alcune attività inizialmente previste, ma dall'altro ha consentito il confronto con dati accelerometri di ottima qualità e senz'altro essenziali per le finalità del progetto. In particolare, alcune simulazioni numeriche previste per il bacino di Tarcento non hanno potuto essere condotte in quanto è stata data priorità per ovvi motivi ad analoghe simulazioni numeriche in condizioni di campo vicino per quanto riguarda il terremoto dell'Aquila.

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate (da consuntivo)

	(mesi uomo)
TOTALE	134
da personale universitario	90
altro personale	77
Personale a contratto a carico del PRIN 2007	77

14. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

Partecipazioni a convegni:

	Già svolti (numero)	Da svolgere (numero)	Descrizione
in Italia	3	1	<p><i>in Italia (già svolti)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ° 29° Convegno Nazionale GNGTS, 26 - 28 Ottobre 2010, Prato. ° 28° Convegno Nazionale GNGTS, 16 - 19 Novembre 2009, Trieste. ° Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica IARG 2009, Sapienza - Università di Roma, 9 - 11 settembre 2009 <p><i>in Italia (ancora da svolgere)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ° "XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica "Innovazione Tecnologica nell'ingegneria Geotecnica", Napoli 22-24 giugno 2011
all'estero	10	3	<p><i>all'estero (già svolti)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ° European Seismological Commission, Montpellier, France, 5-11 settembre 2010. ° 14th European Conference on Earthquake Engineering, August 30 - September 3, 2010, Ohrid, Republic of Macedonia. ° 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Symposium in Honor of Professor I.M. Idriss, May 24-29, 2010, San Diego, California. ° European Geophysical Union, Vienna, Austria, 3-7 maggio 2010. ° International conference on Earthquake Engineering, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 26-28 ottobre 2009. ° FRAGBLAST, Granada, Spagna, 11-17 settembre 2009 ° ACES Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering, 5-6 July 2009, Corfù, Greece. ° 71st EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009 Amsterdam, Netherlands, 8 - 11 June 2009; ° European Seismological Commission, Hersonissos, Crete, Greece, 8-12 settembre 2008 ° 2nd Euro-Mediterranean meeting on accelerometric data exchange and archiving, 10-12 novembre 2009, Ankara, Turkey. <p><i>all'estero (da svolgere)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ° 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Jan 10-13, 2011, Santiago del Cile. ° EUROODYN, 8th International Conference on Structural Dynamics, July 4-6, 2011, Leuven, Belgio. ° 4th IASPEI/IAEE International Symposium "Effect of surface geology on seismic motion", August 23-26, 2011, University of California, Santa Barbara.
TOTALE	13	4	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Articoli pertinenti pubblicati:

	Numero	Descrizione
su riviste italiane con referee	1	° Costa, G., Furlanetto, E., Palmieri, F., Suhadolc, P., 2010. Detailed gravity profile for estimating the sedimentary thickness of the Gemona del Friuli (NE Italy) alluvial fan. Submitted for publication to Mem. Soc. Geol. It.
su riviste straniere con referee	11	° Smerzini C., Paolucci R. and Stupazzini M. (2010) Comparison of 3D, 2D and 1D numerical approaches to predict long period earthquake ground motion in the Gubbio plain, Central Italy. Submitted for publication to Bulletin of Earthquake Engineering. ° Cauzzi C. Faccioli E. and Costa G. (2011) 1D and 2D site amplification effects at Tarcento (Friuli, NE Italy), 30 years later. Journal of Seismology, 15, 1-17, DOI: 10.1007/s10950-010-9202-y, in press.

		<p>° Faccioli E. and Villani M. (2009) <i>Seismic hazard mapping for Italy in terms of broadband Displacement Response Spectra</i>. <i>Earthquake Spectra</i>, vol. 25, 515-539, ISSN: 8755-2930, doi:10.1193/1.3159004</p> <p>° Ameri G., Massa M., Bindi D., D'Alema E., Gorini A., Luzi L., Marzorati S., Pacor F., Paolucci R., Puglia R. and Smerzini C. (2009) <i>The 6 April 2009, Mw6.3, L'Aquila (Central Italy) earthquake: strong-motion observations</i>. <i>Seismological Research Letters</i>, Vol. 80(6), 951-966.</p> <p>° Stupazzini M., Paolucci R. and Igel H. (2009) <i>Near-fault earthquake ground motion simulation in the Grenoble Valley by a high-performance spectral element code</i>. <i>Bulletin of Seismological Society of America</i>, Vol. 99, 886-901.</p> <p>° Moratto, L., Suhadolc, P., Costa, G., 2010. <i>Modelling the Finite-fault Parameters of the Four M>5 September 1976 Friuli (NE Italy) Earthquakes</i>. Submitted to <i>Tectonophysics</i>.</p> <p>° Sandron D., Sirovich L., Pettenati F. (2010). <i>Near-field seismic response of a simple alluvial site in Friuli (Italy)</i>. Submitted for publication.</p> <p>° Socco L.V., Boiero D., Foti S., Wisén R. (2009) "Laterally constrained inversion of ground roll from seismic reflection records", <i>Geophysics</i>, SEG, 74, G35-G45</p> <p>° Socco L.V., Foti S., Boiero D. (2010) "Surface wave analysis for building near surface velocity models: established approaches and new perspectives", <i>Geophysics</i>, SEG, 75, A83-A102</p> <p>° Piatti C., D. Boiero, S. Foti, L.V. Socco (2010) "Constrained 1D joint inversion of seismic surface waves and P-wave refraction traveltimes", Submitted for publication to <i>Geophysical Prospecting</i>, under review</p> <p>° Piatti C., S. Foti, L.V. Socco, D. Boiero (2010) "3D shear wave velocity model of Tarcento Basin", submitted for publication to <i>Bulletin of Earthquake Engineering</i></p>
su altre riviste italiane	0	
su altre riviste straniere	0	
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	17	<ol style="list-style-type: none"> 1. Paolucci R. (2008) <i>Near-fault earthquake ground motion scenarios and engineering implications</i>. <i>Presentazione ad invito alla European Seismological Commission, Hersonissos, Crete, Greece, 8-12 settembre 2008</i>. 2. Smerzini C., Stupazzini M. and Paolucci R. (2011) <i>Numerical simulations of seismic response at Gubbio basin, Central Italy</i>. In: <i>5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Jan 10-13, 2011, Santiago del Chile</i>. 3. Faccioli E., Bianchini A. and Villani M. (2010). <i>New ground motion prediction equations for T > 1 s and their influence on seismic hazard assessment</i>. In: <i>The University of Tokyo Symposium on Long-Period Ground Motion and Urban Disaster Mitigation</i>. Tokyo, March 17-18, 2010, p. 23-29 4. Villani M. Demartinos K., Vanini M. and Faccioli E. (2010). <i>Application of ground shaking scenarios to PSHA and risk assessment in near field</i>. In: <i>14th European Conference of Earthquake Engineering (ECEE)</i>. Lake Ohrid, Macedonia, August 30 - September 3, 2010, p. 1-7 5. Faccioli E., Vanini M., Villani M., Cauzzi C. and Smerzini C. (2010) <i>Mapping seismic hazard to account for basin amplification effects</i>. In: <i>9th International Workshop on Seismic Microzoning Risk Reduction</i>, 8 pp., February 21-24, 2010, Cuernavaca, México. 6. Smerzini C. and Paolucci R. (2010) <i>Strong ground motion in the epicentral region of the MW 6.3 Apr 6 2009, L'Aquila earthquake, Italy</i>. In: <i>5th International conference on Recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Paper EQ4, May 24-29, 2010, San Diego, California</i>. 7. Paolucci R. (2009). <i>Long-period earthquake ground motion: recent advances and observations from the April 6 2009, Mw6.3 L'Aquila earthquake, Italy</i>. In: <i>ACES Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering, 5-6 July 2009, Corfu, Greece</i>. 8. Moratto, L., Suhadolc, P., Costa, G., 2008. <i>Generation and Validation of Real-time Shake Maps in the Southern Alps Area</i>. <i>European Seismological Commission, Hersonissos, Crete, Greece, 8-12 settembre 2008</i>. 9. Suhadolc, P., Costa, G., Moratto, L., 2010. <i>Strong Ground Motion Observation and Estimation: From Predictive Relationships and Modelling to Real-Time Shakemaps</i>. <i>7th General Assembly Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 24-27 novembre 2008</i>. 10. Moratto, L., Suhadolc, P., Costa, G., 2010. <i>Modelling the Finite-fault Parameters of the Four M>5 September 1976 Friuli (NE Italy) Earthquakes</i>. <i>European Geophysical Union, Vienna, Austria, 3-7 maggio 2010</i>. 11. Costa G., Gallo A., Laprocina E., Moratto L., Suhadolc P., 2010. <i>Mw estimation and ShakeMaps generation using real-time accelerometric waveforms recorded in the Southeastern Alps</i>. <i>European Association of Earthquake Engineering (General Assembly)</i>, Skopje, Macedonia, 27 agosto - 1 settembre 2010. 12. Cauzzi, C., Costa, G., Faccioli, E., Vanini, M., 2010. <i>Tarcento, Friuli, 30 Years Later: Earthquake Observational Background for Site Response Analysis</i>. <i>European Association of Earthquake Engineering (General Assembly)</i>, Skopje, Macedonia, 27 agosto - 1 settembre 2010. 13. Costa G., Gallo A., Laprocina E., Moratto L., Suhadolc P., 2010. <i>Mw estimation and ShakeMaps generation using real-time accelerometric waveforms recorded in the Southeastern Alps</i>. <i>8th General Assembly Asian Seismological Commission, Hanoi, Vietnam, 8-10 novembre 2010</i>. 14. Gallo A., Costa G., Suhadolc P., 2010. <i>Fast Moment Magnitude Estimation in the Southeastern Alps</i>. <i>European Seismological Commission, Montpellier, France, 5-11 settembre 2010</i>. 15. Sirovich L., F. Pettenati and D. Sandron (2010). <i>New treatment of intensities to retrieve the sources of pre-instrumental earthquakes and for hazard purposes</i>. <i>Proc. 14ECEE, Ohrid, FYROM-Macedonia, Aug. 30-Sept. 3, 2010</i>. CD Paper #1810, 8 pages. ISBN 978-608-65185-1-6 16. Socco L.V., Boiero D., Foti S., Piatti C. (2010) "Advances in surface wave and body wave integration" In: <i>Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar</i>, BRADFORD J.; HOLLIGER K.; MILLER R., SEG Monograph Series, SEG (USA), pp. 20, In stampa 17. Foti S., Piatti C., Boiero D., Socco L.V. (2011) "Laterally constrained inversion of surface wave data for the characterization of Tarcento basin in Italy" <i>Proc. of 5th Int. Conf. Earthquake Geotechnical Eng., Santiago, Chile, CDrom</i>
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	10	<ol style="list-style-type: none"> 1. Smerzini C., Paolucci R. and Stupazzini M. (2010) <i>A numerical study on the seismic response of Gubbio basin, Central Italy</i>, 29° <i>Convegno Nazionale GNGTS, 26 - 28 Ottobre 2010, Prato</i>. 2. Smerzini C., Sandron D., Faccioli E., Giorgi M., Maffione S., Petronio L., Paolucci R., Pettenati F., Pinna G., Sirovich L. (2010) <i>Different approaches for generating ground shaking maps in near field: a case study in the Friuli region</i>, 29° <i>Convegno Nazionale GNGTS, 26 - 28 Ottobre 2010, Prato</i>. 3. Sandron, D., Sirovich, L., Pettenati, F. and Bobbio, M., 2008. <i>Hints on the strong- and weak-motion response of the Buia (Friuli) SMA-1 accelerometric site</i>. <i>Extended Abstract presented at the 27th GNGTS Congress, Trieste (Italy), Oct. 6-8, 2008</i>. 4. Sandron D., Sirovich L. and Pettenati F. (2010). <i>Effects of empirical calibration (VS/depth/lithology) on the modeling of the seismic response of the Gemona-Osoppo Plain</i>. <i>29th Nat. Conf. GNGTS, Oct. 26-28, 2010, Prato Italy, 4 pages</i>. 5. Paolucci R. (2009) <i>Effetti di sito in configurazioni geologiche complesse</i>, <i>Presentazione ad invito al 28° Convegno Nazionale GNGTS, 16 - 19 Novembre 2009, Trieste</i>. 6. Moratto, L., Suhadolc, P., Costa, G., 2010. <i>Parametri di faglia estesa per le maggiori repliche (M>5) del settembre</i>

		<p>1976 in Friuli. 29. Convegno GNGTS 2010 Prato, 25 - 27 ottobre 2010.</p> <p>7. Piatti C., D. Boiero, S. Foti, L.V. Socco (2010) "1D joint inversion of surface waves and P-wave refraction traveltimes", <i>Incontro Annuale GNGTS, Prato</i></p> <p>8. Boiero D., S. Foti, I.M. Mineo, L.V. Socco, K.H. Stokoe II (2009) "Costruzione di un modello di velocità delle onde di taglio per l'imperial valley", <i>Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Roma, 9-11 settembre</i></p> <p>9. Piatti C., D. Boiero, S. Foti, L.V. Socco (2009) "Integrazione di dati sismici, geologici e geognostici per la costruzione del modello di velocità delle onde di taglio della conca di Tarcento (Friuli)" <i>Incontro Annuale GNGTS, Trieste</i></p> <p>10. Boiero D., S. Foti, I.M. Mineo, L.V. Socco, K.H. Stokoe II (2009) "Costruzione di un modello di velocità delle onde di taglio per l'imperial valley" <i>Incontro Annuale GNGTS, Trieste</i>.</p>
rapporti interni	8	<p><i>Deliverable progetto (disponibili al sito http://rtweb.units.it/prin07/home.htm)</i></p> <p><i>D1: Geological and geophysical characterization of selected sites</i></p> <p><i>D2: Description of the local accelerometer networks installed and operated during the project and archive of relevant acceleration recordings</i></p> <p><i>D3: Report on the characterization of the potential seismogenic sources in Friuli based on instrumental and macroseismic data</i></p> <p><i>D4: Numerical simulations of earthquake ground motion in near-fault conditions</i></p> <p><i>D5: Near-field response of the accelerometric station of Buia (Friuli) during the 4 earthquakes of September 11 and 15, 1976</i></p> <p><i>Rapporti interni OGS</i></p> <p><i>1. Sirovich L., F. Pettenati, D. Sandron, L. Petronio, M. Giorgi, P. Suhadolc, G. Costa, L. Moratto, (2009). Sintesi sullo scenario sismogenetico più plausibile per la scossa del 6/5/76. Relazione OGS 2009/43 GDL 16 SITAR 2009.</i></p> <p><i>2. Sandron D., Sirovich L., Pettenati F. (2009). Is the strong motion response of a site with shallow alluvium in plain easily foreseeable with standard techniques? Relazione OGS 2009/48 GDL 18 SITAR. 2009.</i></p> <p><i>3. Sandron D., Sirovich L., Pettenati F.. Effetti di tarature empiriche (VS/profondità/litologia) di vario dettaglio sulla risposta sismica della piana Gemona-Osoppo-Tarcento. Relazione OGS 2010/50 GDL 9 SITAR, pp 18.</i></p>
brevetti depositati	0	
TOTALE	47	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Data 21/12/2010 12:31

Firma

Si autorizza alla elaborazione e diffusione delle informazioni riguardanti i programmi di ricerca presentati ai sensi del D. Lgs. n. 196/2003 del 30.6.2003 sulla "Tutela dei dati personali". La copia debitamente firmata deve essere depositata presso l'Ufficio competente dell'Ateneo.