

Sviluppo e confronto di metodologie per la valutazione della pericolosità sismica in aree sismogenetiche: applicazione all'Appennino centrale e meridionale

Coordinatore: Dott. Massimo Cocco

Introduzione

1 - Struttura del Progetto. I cambiamenti istituzionali e la mobilità di alcuni ricercatori coinvolti hanno reso necessaria una ulteriore modifica della struttura del progetto. In particolare, sono state accorpate due unità di ricerca: la UR6 Università di Genova è confluita nell'UR4 INGV Milano. L'attuale composizione delle Unità di Ricerca (UR) afferenti al progetto è descritta nella seguente tabella:

Tabella 1: Unità di Ricerca (UR) partecipanti al progetto.

Unità di Ricerca	Responsabile Scientifico	Afferenza	Gruppi di Ricerca esterni (sub-contractors)
UR1	Massimo Cocco	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia INGV – Roma -	Istituto Dinamica Processi Ambientali Roberto De Franco CNR Milano
UR2	Enrico Priolo	Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS), Trieste OGS	
UR3	Aldo Zollo	Università di Napoli UniNa	Università di Bari Agata Siniscalchi
UR4	Paolo Augliera	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia INGV – Milano -	Università di Genova Dip. Scienze della Terra Daniele Spallarosso
UR5	Peter Suhadolc	Università di Trieste UniTri	
UR7	Alfredo Mazzotti	Università di Milano UniMi	

2 - Obiettivi del Progetto. Il progetto è finalizzato allo studio della zona di Colfiorito, identificata come area training grazie all'elevata disponibilità di dati ed informazioni, e alle zone di Città di Castello e della Val D'Agri, entrambe identificate come aree test su cui applicare i risultati degli sviluppi metodologici ottenuti.

Le iniziative portate avanti durante il secondo anno di attività rispettano la pianificazione del lavoro prevista nel progetto esecutivo, e hanno coinvolto tutti e 5 i tasks. In particolare, le attività sono state maggiormente focalizzate sull'area di training di Colfiorito e sull'area test di Città di Castello. Gli obiettivi programmati sono di seguito elencati e suddivisi per tasks.

TASK 1. Caratterizzazione Geometrica e Meccanica delle Sorgenti.

(Responsabile P. Montone, INGV – Roma).

Contribuiscono a questo task UR1, UR3 (Univ. di Bari) e UR7.

Area di Colfiorito

- Sintesi dei risultati delle indagini geofisiche.

- Revisione critica dei modelli di sorgente proposti sulla base dei risultati ricavati dall'elaborazione delle linee di sismica di esplorazione.

Aree Test di Città di Castello e Val D'Agri

- Individuazione delle sorgenti per l'area di Città di Castello.
- Sintesi preliminare delle conoscenze per la Val D'Agri.

TASK 2. Caratterizzazione della struttura crostale.

(Responsabile A. Michelini, OGS – Trieste).

Contribuiscono a questo task UR1, UR2 e UR4.

Area di Colfiorito

- Sintesi e revisione dei modelli di velocità proposti.
- Confronto con i risultati della sismica di esplorazione.
- Modelli di velocità 3D e stima dell'Attenuazione Anelastica.

Aree Test di Città di Castello e Val D'Agri

- Analisi dei dati della campagna di acquisizione di Città di Castello.
- Modello di velocità per la zona di Città di Castello.
- Sintesi delle conoscenze per la Val D'Agri.

TASK 3. Determinazione delle Leggi di attenuazione del moto del terreno.

(Responsabile L. Malagnini, INGV – Roma).

Contribuisce a questo task UR1.

- Determinazione delle leggi di attenuazione per Città di Castello.
- Calcolo dei valori di picco (PGA, PGV) per Colfiorito.
- Elaborazione di mappe di pericolosità per l'Umbria.

Questo ultimo punto costituisce un ulteriore argomento di ricerca aggiunto successivamente alla proposizione ed approvazione del progetto in quanto non era previsto nel piano di lavoro iniziale. È stato aggiunto in quanto costituisce un prodotto raggiungibile in questo task.

TASK 4. Validazione di metodologie per il calcolo di sismogrammi sintetici.

(Responsabile A. Zollo, Università di Napoli).

Contribuiscono a questo task UR1, UR2, UR3, UR4 e UR5.

Area di Colfiorito

- Conclusione dei Blind Tests metodologici.
- Elaborazione degli scenari di scuotimento.
- Calcolo di serie temporali di accelerazione e velocità del terreno.
- Confronto tra i diversi metodi ed i dati.

TASK 5. Caratterizzazione degli effetti di sito.

(Responsabile A. Rovelli, INGV - Roma).

Contribuiscono a questo task UR1 e UR4.

Area di Colfiorito

- Definizione delle funzioni di trasferimento per i siti selezionati.

Aree Test di Città di Castello e Val D'Agri

- Analisi dei dati della campagna di acquisizione di Città di Castello.
- Elaborazione delle informazioni sulla risposta sismica per l'area di Città di Castello.

Con alcune eccezioni, tutti gli obiettivi del progetto sono stati conseguiti. Le uniche attività non completamente ultimate riguardano il confronto tra i modelli di velocità dedotti dall'analisi dei tempi di arrivo delle onde sismiche con i risultati dalla

rielaborazione delle linee di sismica di esplorazione e la stima dell'attenuazione delle onde sismiche con metodi tomografici. Queste attività saranno completate nel corso del terzo anno assieme ad una revisione generale dello stato delle conoscenze per quel che riguarda l'identificazione delle sorgenti.

Risultati Scientifici del Progetto

I risultati scientifici del progetto sono presentati in questo rapporto suddivisi per tasks. Una descrizione più dettagliata delle attività è presentata in una serie di Allegati a cui si fa riferimento.

TASK 1. Caratterizzazione geometrica e meccanica delle sorgenti.

Area di Colfiorito. Elaborazione delle linee di sismica di esplorazione. UR 7 A. Mazzotti. Durante il secondo anno di attività l'UR 7 ha continuato l'analisi e l'elaborazione dei dati sismici a riflessione resi disponibili al progetto. Per i dettagli si consulti l'Allegato T1.A. In particolare:

- 1) È stata terminata la rielaborazione della linea MC347, iniziata durante il primo anno del progetto, ed anche della linea MC357; è stata quindi ultimata la rielaborazione dei tre profili scelti nell'area di Colfiorito. Sebbene i dati originali mostrassero caratteristiche simili, in particolare un basso rapporto segnale/rumore, è stato necessario adattare la sequenza di elaborazione ai problemi specifici di ciascuna linea per ottenere miglioramenti significativi nella qualità dell'immagine sismica finale. Inoltre, poiché è stato ritenuto necessario ottenere immagini di alta qualità sia per tempi relativi a strati superficiali sia per tempi corrispondenti a riflessioni più profonde, l'analisi e l'elaborazione dei dati adottate hanno seguito due differenti approcci con differenti algoritmi e scelta dei parametri, ciascuno con l'obiettivo di ottimizzare il risultato finale nella propria finestra temporale. Questa strategia ha richiesto un duplice sforzo, ma ha condotto ad un significativo miglioramento delle immagini finali che mostrano ora chiaramente le strutture in sottosuperficie, in alcuni casi con dettagli eccellenti (Allegato T1.A).
- 2) Utilizzando il profilo MC347 è stato stimato il campo di velocità delle onde P fino ad una profondità di 4 s, corrispondente a circa 10 km. Questo è stato possibile integrando i risultati derivanti dagli strumenti di analisi di velocità utilizzati in sismica, come l'analisi di velocità di stack, l'analisi di velocità attraverso la migrazione tempi e la PSDM focusing analysis, con i dati di pozzo e le informazioni geologiche disponibili (Allegato T1.A).
- 3) Sulla base del campo di velocità stimato in 2), la linea MC347 è stata migrata in profondità utilizzando l'algoritmo di Kirchoff. Gli sforzi compiuti per migrare in profondità i dati prestack non hanno finora prodotto risultati utili a causa del rapporto S/N molto basso, mentre la sezione in profondità ottenuta mostra interessanti correlazioni con gli eventi sismologici. Come esercizio, gli ipocentri vicini alla linea e con magnitudo alta, presi da Amato et al. (1998), sono stati proiettati su questa sezione. Sebbene gli ipocentri siano stati localizzati facendo uso di un campo di velocità diverso, derivato in modo indipendente rispetto alla sismica e probabilmente più semplice rispetto a quello stimato con la sismica e la geologia, si nota un posizionamento per gli ipocentri che giace vicino alle principali strutture evidenziate nella sezione sismica in profondità (Allegato T1.A). Riteniamo che questo aspetto sia da sviluppare ulteriormente, quindi, nel terzo anno, pensiamo di estendere la stima

del modello di velocità alle altre due linee (PG308, MC357) allo scopo di ottenere un campo di velocità quasi 3D. Questo potrebbe così essere utilizzato sia per ottenere immagini in profondità dei dati di sismica a riflessione, sia per rilocalizzare gli ipocentri, sia per rifinire le determinazioni dei meccanismi focali. Sarà interessante verificare il miglioramento della corrispondenza tra la localizzazione degli ipocentri e la geometria delle strutture evidenziata dalla sismica.

Risultati da ulteriori indagini geofisiche. UR 3 A. Siniscalchi.

Acquisizione dati: In corrispondenza delle emergenze delle principali faglie sono state effettuate 3 tomografie geoelettriche con la configurazione dipolo-dipolo. Nel dettaglio, nell'area epicentrale del 1997 sono state eseguite: (i) una tomografia geoelettrica multiscala diretta perpendicolarmente al segmento di faglia Annifo-Cesi, attraverso la Palude di Colfiorito (sono state utilizzate 2 diverse spaziature elettrode, una di 20m e l'altra di 60m); (ii) 2 tomografie geoelettriche dirette sub-perpendicolarmente al segmento di faglia M. Pennino – M. Prefoglio. In particolare, una è stata eseguita in corrispondenza di M. Faeto e l'altra in corrispondenza di M. Prefoglio (per entrambi i profili è stata utilizzata una spaziatura elettrode di 60m). I dati sperimentali sono stati sottoposti ad inversione da cui è stato ottenuto un modello 2D che fornisce una ricostruzione accurata del sottosuolo fino a circa 200m. I risultati di queste analisi sono descritti in dettaglio nell'Allegato T1.B.

Queste tomografie geoelettriche costituiranno il vincolo essenziale per l'inversione dei dati magnetotellurici a profilo continuo che sono in fase di raccolta.

Revisione Critica dei Risultati (UR1). Il riprocessamento delle linee sismiche a riflessione, in questo caso delle linee PG-308, MC-347 ed MC-357, è certamente un metodo valido per una migliore ricostruzione delle geometrie delle faglie in profondità (un esempio è nell'allegato T1.C). L'interpretazione definitiva è stata effettuata per la linea PG-308, congiuntamente all'analisi della sequenza sismica attivata nell'aprile 1998 a Gualdo Tadino, ed è stata avviata l'interpretazione finale della MC-347 e MC-357. Con questa metodologia si è avuta la conferma della geometria delle sorgenti attivate nel 1997. Nel corso dell'ultimo anno di attività saranno rivisitate tutte le informazioni ri-elaborate al fine di costruire un modello sinottico delle sorgenti potenzialmente sismogenetiche nell'area di Colfiorito.

Aree di Città di Castello e Val D'Agri (UR1). Per l'area di Città di Castello sono proposte come sorgenti di progetto due strutture sismogenetiche. Le ricerche effettuate hanno contribuito alla definizione della faglia Alta Tiberina (ATF) come una faglia sismogenetica d'importanza regionale capace di generare microsismicità, ma anche eventi di moderata entità ($M_d=4.3$ sequenza 2001). Le caratteristiche geometriche dell'ATF sono state evidenziate dall'interpretazione della sismica a riflessione AGIP, in collaborazione anche con l'Università di Perugia. La sorgente preliminare che si propone per ATF (Allegato T1.C) è compresa tra il CROP03 e l'area dove si è attivata la sequenza 2001, con una direzione variabile tra NNW-SSE e WNW-ESE, un dip di circa 20° per un'estensione di circa 15 km. Il top dell'ATF risulta in alcuni tratti prossimo alla superficie mentre in altri la raggiunge. Per analogia con l'area meridionale, si presuppone l'esistenza di una faglia sismogenetica Wimmergente: in questa fase di studio, però, non siamo ancora in grado di fornire i reali parametri geometrici e cinematici. Possiamo solo ipotizzare una struttura NW-SE (N130-160) con dip compreso tra 40° e 60° W immergente a

cinematica distensiva. La lunghezza della probabile struttura è ipotizzata tra 10 e 15 km e ubicata in posizione più interna rispetto al bacino, senza arrivare in superficie. Sono state visionate diverse linee sismiche passanti per la Val d'Agri (Allegato T1.C), le due più significative mostrano una faglia principale posta sul lato orientale del bacino SW immergente responsabile della strutturazione primaria del bacino stesso, e faglie, sul lato opposto, secondarie NE immergenti che mostrano un rigetto trascurabile. La faglia principale SW immergente si può seguire fino a circa 0.6 s TWT con una pendenza calcolata di circa 50°, a profondità maggiori tende a divenire più piatta. Dai dati analizzati finora non si può definire se le faglie riconosciute sui profili sono oggi ancora attive e in grado di generare terremoti, ma ai fini di una modellazione geometrica della struttura queste informazioni allo stato attuale delle nostre conoscenze risultano preziose ed in molti casi uniche. In particolare, per l'evento del 1857 non esiste un consenso generale riguardo alla struttura sismogenetica responsabile. Ci sono due ipotesi alternative (Benedetti et al., 1998; Valensise and Pantosti (2001), a cui noi facciamo riferimento: una faglia distensiva immergente a SW posta sul lato orientale del bacino o una faglia distensiva immergente a NE posta sul lato occidentale. In entrambe le aree di studio, l'interpretazione di nuove linee sismiche a riflessione e l'analisi di nuovi dati permetterà una definizione migliore delle strutture.

TASK 2. Caratterizzazione della struttura crostale.

Modelli di Velocità. UR2 (Alberto Michellini) e UR1 (Claudio Chiarabba)

1. Aree training di Gualdo Tadino, Colfiorito, Norcia:

1.1 struttura crostale, modelli 1-D per Colfiorito. E' stato applicato anche a questo set di dati la tecnica di ricerca della struttura di velocità utilizzando l'algoritmo genetico di cui sopra. Sono stati individuati un totale di 522 terremoti per circa 12700 fasi P e 12200 fasi S. Questo set di dati include tutte le stazioni che hanno operato simultaneamente (INGV+GNDT) nella sequenza del 1997 a Colfiorito. I risultati ottenuti indicano la difficoltà di discernere strutture crostali 1-D univoche allorché si utilizzano dati raccolti in aree, come per Colfiorito, contraddistinte da rilevanti eterogeneità laterali del modello di velocità (P e S). Inoltre, poiché detti modelli monodimensionali di velocità sono richiesti per il calcolo di sismogrammi sintetici completi al fine di effettuare scenari di scuotimento (si veda Task 4), ne segue che la loro inerente non univocità contribuisce ad ulteriore indeterminatezza nel calcolo di realistiche mappe di scuotimento (*allegato T2.A*). Questo richiede e motiva l'utilizzo congiunto di dati sismologici ed informazioni provenienti da dati di sismica di esplorazione (si veda Task 1).

1.2 Analisi delle forme d'onda dei terremoti registrati, arrivi delle onde P e S, localizzazione del terremoto e meccanismi focali e struttura 3-D. E' stato risolto un modello 3-D dei primi chilometri crostali dell'area di Colfiorito con spaziatura di 2 km in x e y e 1 km in z. Le distribuzioni delle anomalie di V_p e V_p/V_s indicano forti eterogeneità del mezzo e mostrano i principali elementi tettonici del substrato. In particolare la struttura è costituita da diverse unità coinvolte in thrust est-vergenti. Le faglie normali si sviluppano principalmente dietro ai piani di thrust a bassa inclinazione. Sono state inoltre applicate tecniche di cross-correlazione delle forme d'onda e di rilocalizzazione relativa (usando il software hypoDD) per aumentare la risoluzione della geometria delle faglie in profondità. La distribuzione di circa 1500

terremoti fornisce immagini del sistema di faglie nella zona con errori inferiori a 50 m. Questo studio di dettaglio conferma il modello di sorgente proposto ed utilizzato nel Task 4.

1.3 *Inversione 3-D di Q_p e Q_s per l'area "training" di Colfiorito.* Durante il secondo anno del progetto non è stata ancora svolta alcuna attività in questo campo di studio.

2. *Esperimento di Città di Castello:*

2.1 *Processamento e l'analisi dati acquisiti.* Sono stati individuati un totale di 2472 terremoti per circa 26500 fasi P e circa 24000 fasi S. Il numero di terremoti è risultato almeno 4 volte maggiore di quanto stimato ad inizio esperimento. È stata svolta una verifica dell'accuratezza delle letture delle fasi P e S utilizzando una procedura simile a quella di Wadati che si basa sulla corrispondenza nelle differenze dei tempi osservati tra fasi P e S (*allegato T2.B*).

2.2 *Primi risultati di localizzazioni e struttura crostale, modelli 1D e 3D. **Struttura 1D:***

Si è effettuata un'inversione per il modello di velocità 1-D utilizzando un metodo di ricerca globale che si avvale dell'algorithm genetico come driver di ricerca non lineare e del programma standard HYPOELLIPSE per la parte diretta. È stato individuato un set di modelli che permettono di ottenere *rms* di localizzazione medi piuttosto bassi (0.13 s) se si considerano il numero di stazioni utilizzate e l'estensione dell'area. I risultati indicano in generale una struttura caratterizzata da un rilevante incremento delle velocità vicino alla superficie non rappresentabile con strutture con un numero arbitrario di strati (*allegato T2.B*). *Rilocalizzazione degli eventi con tecnica delle doppie-differenze:* I terremoti registrati durante l'esperimento sono stati localizzati sia con metodi standard che utilizzando il metodo delle doppie differenze. Per quest'ultima analisi, le letture delle fasi sono state ripetute utilizzando il metodo delle cross-correlazioni. I risultati finora ottenuti indicherebbero allineamenti di eventi altrimenti non risolvibili con le tecniche standard (vedi Figura 1). **Struttura 3-D:** Per il modello 3-D, sono state effettuate delle inversioni preliminari con la tecnica, variante di Thurber (1983), proposta da Michelini e McEvilly (1991). I risultati preliminari evidenziano una generale corrispondenza tra le strutture geologiche di superficie e quelle individuate in profondità (*allegato T2.B*).

2.3 *Struttura di attenuazione Q_p , Q_s .* Sono stati calcolati i valori di t^* dai sismogrammi dei terremoti per l'inversione per la struttura di attenuazione. I risultati saranno completati e presentati durante il terzo anno di attività.

TASK 3. Determinazione delle leggi di attenuazione.

UR1. Luca Malagnini.

Scopi di questo Task per il secondo anno del progetto sono: i) la quantificazione delle relazioni di attenuazione del ground motion nella regione circostante Città di Castello, ii) il calcolo dei valori di picco (PGA, PGV) ai siti che hanno registrato i forti scuotimenti del terreno in occasione dei mainshocks della sequenza del 1997-98, utilizzando le leggi di attenuazione regionale di Malagnini e Herrmann (2000), iii) una mappa di pericolosità sismica della regione Umbria; questo ultimo obiettivo non fa parte del progetto originale, ma è stato aggiunto in corso d'opera, visto che i risultati ottenuti per il Task 3 lo permettevano. Considerato che le caratteristiche della propagazione crostale non cambiano all'aumentare della magnitudo, e che registrazioni strong-motion sono effettuate molto di rado, abbiamo utilizzato la gran

mole di registrazioni weak-motion che proviene dal monitoraggio della sismicità di fondo per quantificare le leggi di attenuazione per il ground motion a scala regionale.

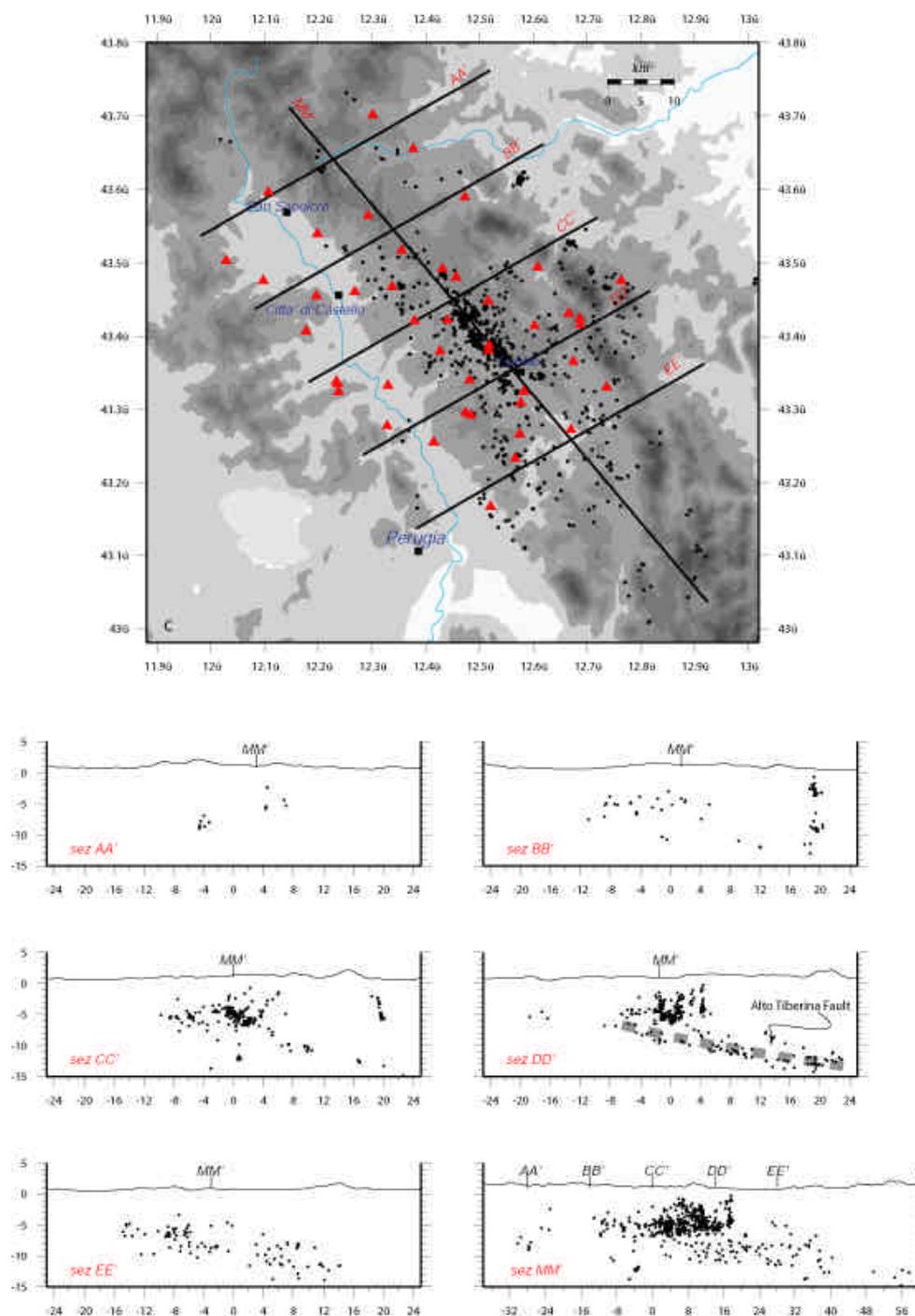


Figura 1. Distribuzione degli ipocentri dei terremoti registrati durante l'esperimento d'acquisizione nella zona di Città di Castello. Questi dati originali hanno permesso di individuare la geometria della Faglia Alto Tiberina. I dati acquisiti sono stati utilizzati nel progetto per effettuare localizzazioni di precisione mediante tecniche moderne come le doppie-differenze (Task 1 e 2), per determinare la struttura crostale dell'area (Task 2), per vincolare le leggi di attenuazione del moto del suolo (Task 3) e per caratterizzare la risposta sismica locale (Task 5).

Le regressioni sono state eseguite su un data set molto importante di registrazioni weak-motion, sia sui valori di picco delle forme d'onda filtrate passabanda, sia sulle ampiezze di Fourier (vedi Malagnini et al., 2000, 2002 per i dettagli tecnici dei metodi). I logaritmi dei valori di picco osservati sulle forme d'onda filtrate possono essere scritti nel seguente modo: $PEAK(r,f)=EXC(f)+D(r,f)+SITE(f)$, dove $PEAK(r,f)=\text{Log}(\text{peak}(r,f))$, $EXC(f)$ e' un termine di eccitazione (sorgente), $SITE(f)$ rappresenta il comportamento del sito, e $D(r,f)$ e' l'attenuazione crostale regionale. Insieme ai valori di picco ed alle ampiezze di Fourier viene quantificata, in tutte le bande di frequenza, la durata dello scuotimento significativo in funzione della distanza ipocentrale. Quest'ultima informazione e' utilizzata, attraverso lo strumento della Random Vibration Theory (RVT) per modellare i valori di picco in funzione di frequenza e distanza ipocentrale, ovvero per ottenere stime di PGA, PGV, PSA. Tutte le quantità appena descritte possono essere utilizzate per la produzione di mappe di pericolosità sismica in cui si tenga conto delle caratteristiche regionali della propagazione che determinano il ground motion. La modellazione dei risultati delle regressioni fornisce un funzionale di attenuazione crostale, oltre a informazioni relative alla radiazione di alta frequenza ed all'attenuazione superficiale (κ). Tutte queste quantità potranno essere utilizzate per la produzione di mappe di hazard regionale di moderna concezione. Per quanto riguarda il data set, per il momento abbiamo selezionato 521 eventi, per un totale di 8079 forme d'onda, registrati nella regione di Città di Castello. L'intero data set disponibile e' di circa 2000 eventi e 60000 forme d'onda. La figura 2a mostra l'attenuazione regionale ottenuta, con l'indicazione dei parametri ricavati dalla modellazione delle curve empiriche. La linea tratteggiata orizzontale rappresenta un decadimento con la distanza pari a $1/r$. Una stima stabile del parametro di attenuazione superficiale non è stata ancora ottenuta. La regione in studio mostra differenze in apparenza rilevanti con la regione della sequenza dell'Umbria-Marche (1997-98), con una dipendenza del parametro $Q(f)$ dalla frequenza più forte ($Q(f)=130 f^{0.1}$ per il resto dell'Appennino e per la regione di Colfiorito, $Q(f)=65 f^{0.63}$ per Città di Castello). In realtà, quando il parametro κ sarà disponibile anche per Città di Castello, ci aspettiamo che i due modelli di attenuazione forniscano risultati equivalenti in termini di attenuazione totale. Le differenti distanze coperte dai data sets dell'Appennino Centrale determinano differenti tradeoffs tra Q_0 e $g(r)$ e quindi differenti modelli di attenuazione apparente. Per quanto riguarda la più forte dipendenza dalla frequenza della funzione $Q(f)$, essa rappresenta una differenza "vera" tra la regione di Città di Castello e l'intero Appennino. La figura 2b mostra i picchi di accelerazione (sinistra) e velocità (destra) osservati durante il terremoto del 6/5/1997 ($M_w=5.9$), confrontati alle stime ottenute utilizzando i risultati di Malagnini e Herrmann (2000). La figura 2c, infine, mostra mappe di pericolosità sismica probabilistica, in termini di PGA, ottenute utilizzando l'attenuazione di Malagnini e Herrmann (2000), il database delle faglie attive di Valensise e Pantosti (2001), per siti BC. E' stato utilizzato un albero logico che prevedeva il 50% di probabilità da assegnare ad un modello di terremoto caratteristico, ed il 50% da assegnare al comportamento tipo Gutenberg-Richter.

TASK4. Validazione di metodologie per il calcolo dei sismogrammi sintetici
UR1, UR2, UR3, UR4, UR5.

Questo macro-obiettivo comprende studi di carattere metodologico ed applicativo finalizzati alla predizione del movimento forte del suolo considerando modelli realistici di frattura sismica e di propagazione. Per la modellistica della sorgente sismica sono adottate ed implementate tecniche numeriche che considerano fratture eterogenee. L'effetto di propagazione è valutato attraverso metodi asintotici e di calcolo del campo completo in mezzi 1-D/3-D. Nel secondo anno l'attività principale è stata indirizzata al completamento dei test di simulazione di movimenti forti del suolo nell'area training di Colfiorito secondo due obiettivi principali: 1) simulazione del moto forte del suolo prodotto da una sorgente estesa (caso deterministico, si veda l'Allegato T4.A) e comparazione con parametri strong motion desunti da dati osservati; 2) realizzazione di scenari statistico-deterministici (in termini di parametri strong motion) per l'area di training (Allegato T4.B). Nel contempo è proseguita l'attività di sviluppo metodologico che ha riguardato lo sviluppo, la sperimentazione e la validazione dei diversi metodi di simulazione full wave, asintotici e basati sulle funzioni di Green empiriche.

RISULTATI. Nel primo anno le UR hanno condotto un'attività di sviluppo metodologico e d'applicazione all'area training di Colfiorito interessata dalla sequenza sismica del 1997. In particolare il problema del confronto quantitativo dei sismogrammi sintetici calcolati con diversi metodi numerici è stato affrontato mediante la realizzazione di una serie di test di comparazione di forme d'onda e spettri calcolati per una dimensione, geometria e meccanismo di sorgente che riproduce il caso del terremoto principale della sequenza di Colfiorito (Blind Test, si veda l'Allegato T4.A). Sono stati confrontati i seguenti metodi: stocastico-deterministico (DSM, asintotico), asintotico (ASM), wave number integration (WIM, campo completo), somma modale (MSM, campo completo). I risultati sono descritti in dettaglio nell'Allegato T4.A. Nel secondo anno l'attività di test metodologici nell'area training ha riguardato:

1) Calcolo dei sismogrammi sintetici e confronto dei parametri strong motion relativi al main shock della sequenza sismica di Colfiorito. Questo test è stato eseguito per verificare la capacità di ciascun metodo di simulazione a riprodurre le registrazioni del terremoto di Colfiorito ($M_w=6$), del 26 Settembre, 09:40 GMT. I due modelli di sorgente utilizzati sono stati ottenuti l'uno mediante la modellazione di dati strong motion (Zollo et al., 1999), l'altro dall'inversione di dati geodetici (Salvi et al., 2000). Alle UR che partecipano all'attività del Task 4 è stato richiesto di calcolare le serie temporali dell'accelerazione del suolo, velocità e spostamento per ciascun modello di sorgente ad una griglia regolare di 64 ricevitori ed a 8 stazioni sparse distribuiti su di un'area di circa 60x60 km² intorno alla faglia di Colfiorito. La frequenza massima dei segnali sintetici calcolati è stata fissata a 5 Hz (si veda l'Allegato T4.A). I risultati ottenuti per i diversi metodi di simulazione (e per i due modelli di sorgente) sono stati confrontati utilizzando valori di picco ed alcune quantità integrali (intensità di Arias ed Housner, durata...). Per quanto riguarda l'approccio mediante la teoria asintotica, i due metodi (ASM e DSM) forniscono distribuzioni spaziali simili dei parametri di picco del moto del suolo (PGA, PGV e PGD) e prevedono effetti di direttività significativi. Le durate degli accelerogrammi sono anch'esse comparabili, sebbene il metodo stocastico DSM predice segnali più complessi, a causa della presenza di una

componente random dello spettro di fase. In generale, i sismogrammi calcolati mediante i metodi asintotici mostrano durate più brevi che quelle calcolate dai metodi di campo completo. Ciò si spiega con il fatto che questi ultimi includono arrivi di onde primarie, secondarie, onde di superficie ad alta frequenza e riverberazioni.

I sismogrammi calcolati mediante i metodi di campo completo, dipendono dal modello di velocità in modo più critico rispetto a quelli calcolati nell'approssimazione asintotica. Ciò si traduce in una sostanziale differenza tra le distribuzioni spaziali dei parametri di picco del moto del suolo, anche per lo stesso modello di sorgente.

La comparazione dei sintetici con le registrazioni dell'evento di Colfiorito presenta: (i) forme spettrali consistenti alle basse frequenze ($f < 3\text{Hz}$); (ii) un effetto di amplificazione delle alte frequenze, probabilmente legata al sito nelle registrazioni reali che non è predetta dai sismogrammi sintetici; (iii) un ragionevole accordo tra i valori osservati e predetti dei parametri di picco del moto del suolo (entro un fattore massimo di 3). Inoltre i sintetici calcolati per il modello geodetico, presentano livelli maggiori di ampiezze del moto del suolo rispetto a quelle del modello accelerometrico (di circa il 30%). Ciò indica chiaramente che il modello di sorgente influenza in modo determinante i valori predetti del moto del suolo. Maggiori dettagli circa queste attività di ricerca possono essere trovati negli allegati T4.C, T4.D, T4.E e T4.F.

2) Costruzione di scenari di scuotimento: confronto tra i vari metodi e confronto con i dati registrati. Scopo del test è quello di produrre un confronto quantitativo tra gli scenari di terremoto risultanti dalla simulazione del movimento forte del suolo con diverse metodologie. Il terremoto di riferimento è quello principale della sequenza di Colfiorito ($M_w=6.0$), del 26 Settembre 1997. La geometria della faglia, il meccanismo di dislocazione ed il modello di velocità sono parametri fissati nel test. La variabilità del moto simulato è associata ai parametri della rottura, la posizione del punto di nucleazione, la distribuzione di dislocazione finale e di velocità della rottura. Questa ultima è considerata variabile in un intervallo pari a $0.75-0.95 V_s$, con V_s la velocità delle onde di taglio. La massima frequenza simulata è 10 Hz . Allo scopo di verificare gli effetti di direttività associati con la propagazione della rottura, i risultati delle simulazioni sono raggruppati in tre famiglie ciascuna delle quali è ottenuta variando la posizione del punto di nucleazione in sub-aree della faglia. Per ciascuna famiglia di scenari di frattura, è effettuata un'analisi statistica per valutare la variabilità attesa dei parametri strong motion. La costruzione degli scenari di scuotimento calcolati ed il loro confronto sono in fase di conclusiva: sono stati calcolati tutti i sismogrammi ed è in corso di completamento la statistica ed il confronto dei risultati. I risultati preliminari indicano che l'ampiezza del moto del suolo dipende criticamente dal valore di velocità di rottura. Nell'ambito delle simulazioni effettuate con i metodi asintotici si evidenzia una variazione di un fattore circa 3 nei valori di picco nell'intervallo esplorato di velocità di rottura. Sempre per quanto riguarda i metodi asintotici, il confronto dei sintetici con i valori osservati del moto del suolo alle stazioni accelerometriche che hanno registrato il terremoto di Colfiorito, mostra delle discrepanze, che possono essere attribuite ad effetti di amplificazione locale non presi in conto nella simulazione. Una dettagliata presentazione dei risultati è descritta negli Allegati T4.B e T4.F.

3) Validazione dei metodi di simulazione full wave. Sono stati valutati i seguenti metodi: a) EXWIM (UR2), basato su Wavenumber Integration Method di Herrmann

(1996); b) due diversi metodi di somma modale, rispettivamente MSM (UR5) di Panza et al. (1985) ed EXMSM (UR2) basato sul modale di Herrmann (1996); c) COMPSYN di Spudich e Xu (2002) basato sul Discrete Wavenumber-Finite Element Method Olson et al. (1984) (UR2). I test effettuati con sorgente puntuale e sorgente estesa (si veda Allegato T4.E) hanno mostrato che i tre metodi forniscono risultati equivalenti (ovvero, con differenze trascurabili) se utilizzati all'interno del proprio campo di applicabilità e con discretizzazione della sorgente estesa identica. Esistono tuttavia delle sostanziali differenze che rendono un metodo preferibile all'altro in relazione al tipo di problema da affrontare. Il metodo modale calcola i sismogrammi sintetici in modo formalmente corretto solo a distanze superiori alla profondità sorgente. Le differenze riscontrate per la sorgente puntuale sussistono ed anzi diventano critiche con le simulazioni di sorgente estesa per studi di scenario, dove le condizioni critiche vengono facilmente raggiunte e risulta difficile effettuare un controllo a posteriori sull'attendibilità della soluzione. Dal punto di vista computazionale, il metodo modale è molto più efficiente di quello basato sull'integrazione dei numeri d'onda, ed è quindi preferibile per il calcolo ad una certa distanza dalla sorgente. I metodi basati sull'integrazione dei numeri d'onda, COMPSYN ed EXWIM, adottano descrizioni simili della rottura lungo la faglia estesa e producono risultati equivalenti. COMPSYN è molto efficiente perché sfrutta il teorema di reciprocità, tuttavia non tratta l'attenuazione, e questo comporta la necessità di dover adottare correttivi per ricevitori distanti. Per quel che riguarda lo sviluppo metodologico, EXWIM è stato migliorato sia per l'efficienza computazionale, introducendo una tecnica di interpolazione della sorgente, che per il calcolo in alta frequenza, introducendo una ibridizzazione stocastica. È stato completato lo sviluppo metodologico di base del metodo pseudo-spettroale 3-D staggered di Fourier. È stata migliorata l'efficienza di calcolo per numerose sorgenti (propedeutica all'applicazione per simulazioni di sorgente estesa e alla costruzione di scenari) sfruttando il principio di reciprocità. Inoltre, è stata sviluppata una procedura di creazione del modello 3-D e del magliaggio regolare attraverso il software Gocad[®].

4) Tecniche di simulazione basate sulle funzioni di Green empiriche, (L. Scognamiglio). È stato implementato il metodo di calcolo, proposto e sviluppato da Hutchings e Wu (1990), che utilizza le funzioni di Green empiriche (empirical Green's function, EGF) per simulare sismogrammi sintetici e per applicarlo al terremoto di Colfiorito. A partire dai dati esistenti in letteratura, abbiamo definito la geometria ed un intervallo di parametri di rottura possibili per la faglia dell'evento del 26/09/97, identificando un numero di possibili modelli di sorgente (descritto nell'Allegato T4.A). Per ogni modello abbiamo quindi calcolato sismogrammi sintetici, utilizzando, come EGF, 33 aftershocks dell'evento registrati a stazioni vicine. Abbiamo utilizzato il programma HAZARD (Hutchings, 2002) per scegliere a caso i parametri di sorgente, e il programma EMPSYN (Hutchings, 1991) per calcolare i sismogrammi sintetici con le EGF. Abbiamo deciso di quantificare l'accordo tra il dato osservato e quello simulato confrontandoli sulla base dello spettro di risposta in velocità (PSV). Abbiamo poi identificato il sismogramma sintetico relativo al miglior modello di sorgente usando come criterio l'Intensità di Housner. I risultati sono descritti in dettaglio nell'Allegato T4.G.

COMMENTI GENERALI. La sperimentazione attraverso test di simulazione sull'area di training di Colfiorito ha messo in evidenza una serie di problematiche a cui bisogna

far fronte in caso di applicazione di queste metodologie agli studi di scenario nelle aree test:

1. Modelli di velocità. Anche assumendo modelli stratificati 1D per simulare la propagazione a scala crostale, le forme d'onda ed i parametri strong motion sono influenzati (in maniera critica per i metodi campo completo) dalla profondità delle discontinuità e dai relativi contrasti di impedenza. Nel caso particolare di Colfiorito, la re-interpretazione tomografica dei dati effettuata nel Task 2 ha fornito una famiglia altamente eterogenea di strutture 1-D equivalenti, delineando una generale incertezza nella definizione del modello. Ai fini della valutazione del moto forte, si sottolinea che è opportuno indirizzare l'attenzione verso quelle soluzioni in grado di massimizzare lo scuotimento. Se esistono discontinuità verticali nella struttura di velocità della crosta superiore (come è verosimile in area Appenninica), queste sono capaci di generare fenomeni di riflessione e conversione di onde con ampiezza rilevante nelle registrazioni sismiche. E' quindi di primaria importanza che le discontinuità sismiche nel modello di velocità che viene adottato per le simulazioni siano verificate attraverso dati di varia natura, ivi inclusi i dati di prospezione sismica e/o di pozzo eventualmente disponibili.

2. Modelli di sorgente. I parametri deterministici di faglia (dimensioni e geometria del piano di faglia, meccanismo di scivolamento e momento sismico atteso) vanno definiti nel modo più accurato e, per ciascuno di essi, va fornito un intervallo di variabilità atteso che deve intervenire nella simulazione di scenario. Nel caso (fortunato) di Colfiorito, per il quale erano disponibili due diversi modelli di sorgente, i risultati delle simulazioni hanno mostrato significative differenze.

3. Effetti di sito. Sia dalla comparazione con i dati disponibili che da informazioni di letteratura, si evince la necessità di includere, negli studi di scenario, l'effetto di uno strato superficiale, di spessore tipico per l'area (ad esempio, per Colfiorito pari a 250m), che permette di simulare in maniera approssimata l'amplificazione/attenuazione al sito. Questo può avvenire anche mediante la convoluzione dei segnali simulati su roccia per la risposta impulsiva dello strato superficiale calcolata in varie situazioni geologiche tipiche dell'area in esame. Sarebbe auspicabile introdurre negli studi di scenario anche la variabilità spaziale delle condizioni di sito.

TASK5. Caratterizzazione degli effetti di sito.

UR1- UR4

Metodi di indagine e dati analizzati:

1) Per stimare l'amplificazione al sito delle stazioni accelerometriche che hanno registrato la scossa del 26 settembre 1997 alle ore 09:40 si sono utilizzati i dati strong-motion e weak-motion registrati ad ogni stazione durante la sequenza Umbria-Marche (allegati T5.A e T5.B). Sono state inoltre raccolte tutte le informazioni disponibili sulle condizioni geologiche, geotecniche e topografiche locali (allegato T5.B). Alle registrazioni strumentali sono state applicate due tecniche di stima: la prima consiste in un'inversione che separa il contributo della sorgente dal contributo della propagazione e del sito (Andrews, 1986), la seconda calcola i rapporti spettrali H/V sulle fasi S delle registrazioni a 3 componenti. Queste stime empiriche sono poi state confrontate con funzioni di trasferimento teoriche 1D, con modello lineare (Haskell-Thomson) e lineare-equivalente

(Shake91). In generale si trova un buon accordo tra le diverse forme spettrali; tuttavia, le stime teoriche tendono sempre a sottostimare, anche in misura rilevante, le stime empiriche. I dettagli sono descritti nell'Allegato T5.B.

- 2) A seguito dell'esperimento di Città di Castello, i sismogrammi acquisiti lungo il profilo AA' sono stati utilizzati per stimare i ritardi delle fasi P ed S, e quindi dedurre l'andamento dell'interfaccia bedrock – riempimento sedimentario. Tali stime sono state confrontate con i risultati di una campagna di acquisizione di microtremiti a Città di Castello, i cui rapporti spettrali H/V evidenziavano una frequenza di risonanza che tendeva verso frequenze più basse nella zona del profilo con il massimo spessore dei depositi alluvionali (si veda l'Allegato T5.C).

Obiettivi raggiunti e risultati conseguiti:

- 1) Una volta stimato l'effetto locale alle stazioni accelerometriche sia in un approccio teorico che sperimentale, la scelta della funzione di trasferimento ottimale non è un'operazione immediata. Purtroppo le funzioni di trasferimento teoriche, che presentano il vantaggio dell'applicabilità in campo non-lineare per simulazioni di forti terremoti, sottostimano molto l'amplificazione mostrata dalle stime empiriche. Al contrario i rapporti spettrali H/V rappresentano un ottimo compromesso tra il massimo della stima (contributo spettrale del sito dedotto dall'inversione) e il minimo rappresentato dalle funzioni di trasferimento teoriche. Tuttavia, i rapporti spettrali H/V soffrono di una grossa limitazione: non esiste una chiara base teorica che possa consentire di usarli come funzioni di trasferimento, a parte considerazioni puramente empiriche. Alla luce dei risultati ottenuti, per effettuare il confronto con i dati registrati in occasione dell'evento del 26 Settembre 1997 ore 9:40 si propone di non adottare le funzioni di trasferimento ottenute con un unico metodo. Nell'allegato T5.A vengono fornite indicazioni specifiche stazione per stazione.
- 2) Per l'area di Città di Castello sono stati calcolati i rapporti spettrali rispetto ad una stazione di riferimento collocata su un vicino affioramento calcareo (Miocene Medio). L'uso di eventi di bassa magnitudo ($M < 2$) e l'alto rumore delle stazioni in area urbana impediscono l'uso di questa tecnica spettrale a frequenze < 1 Hz. Sfortunatamente, l'applicazione della tecnica di Nakamura ai microtremiti misurati nell'area urbana indica che la frequenza di risonanza scende al di sotto di 1 Hz per una gran parte dell'area urbana (T5.C). Per studiare in prima approssimazione l'effetto dei depositi alluvionali della Val Tiberina, si è fatto uso di un modello lineare-equivalente (Shake91) che ha fornito le funzioni di trasferimento 1D in corrispondenza di diversi spessori della copertura alluvionale e di diversi livelli di deformazione (derivanti da variazioni di magnitudo e distanza epicentrale). Queste simulazioni numeriche (Allegato T5.D) hanno messo in evidenza come il ruolo delle sabbie argillose della Val Tiberina, per eventi di forte magnitudo, possa variare significativamente nelle diverse situazioni.

Prodotti delle Ricerche

Il progetto ha stimolato importanti attività di ricerca finalizzate alla produzione di scenari di scuotimento e mappe di pericolosità nelle aree selezionate. I principali prodotti delle ricerche sono:

1. Linee sismiche interpretate dopo una rielaborazione con moderne metodologie numeriche.

2. Modello della struttura crostale per l'area di Colfiorito, determinazione del grado di eterogeneità, e sua traduzione in modelli fruibili dai modellatori.
3. Sismogrammi e localizzazioni ipocentrali per l'area di Città di Castello ottenute grazie alla campagna di acquisizione svolta nel primo anno di attività.
4. Funzioni di trasferimento e risposta sismica locale per Città di Castello.
5. Leggi di attenuazione per le aree di Colfiorito e Città di Castello dedotte da sismogrammi digitali mediante moderne metodologie numeriche.
6. Indicazioni derivate dai risultati del confronto metodologico tra le diverse procedure numeriche adottate per la previsione del moto del suolo.
7. Scenari di scuotimento per l'area di Colfiorito e confronto con i dati strong motion disponibili.
8. Funzioni di trasferimento per i siti che hanno registrato segnali durante il terremoto di Colfiorito.
9. Mappe di pericolosità a scala regionale per l'Umbria.

Conclusioni

Nel secondo anno di attività sono stati raggiunti tutti i principali obiettivi previsti nel progetto esecutivo. Alcune ricerche richiedono un completamento che sarà ottenuto durante l'ultimo anno del progetto. Le attività di raccolta dati la loro analisi ed interpretazione per l'area di Colfiorito possono ritenersi concluse. Gli scenari di scuotimento e le mappe di pericolosità sono state calcolate anche se ulteriori ricerche saranno eseguite nel terzo anno. Si tratta ora di riassumere in un quadro sinottico i risultati di tutte le attività svolte nell'area training di Colfiorito. Un ulteriore sforzo è necessario per ottenere una sintesi di tutte le attività. I risultati ottenuti forniranno indicazioni sulle decisioni da prendere per eseguire il calcolo degli scenari di scuotimento nelle aree test. Questi saranno eseguiti durante il terzo anno di attività. Lo stato delle ricerche consente un'immediata applicazione all'area di Città di Castello, mentre nuovi studi sono in corso di svolgimento nella Val D'Agri. La ridotta disponibilità di dati per questa zona richiede, infatti, nuovi studi per giungere all'elaborazione di scenari di scuotimento e mappe di pericolosità.

Il livello delle conoscenze nell'area training di Colfiorito permette l'elaborazione di un modello tridimensionale per l'area, che sarà utilizzato per il calcolo di sismogrammi sintetici finalizzati alla proposizione di scenari di scuotimento in cui la propagazione delle onde sismiche sia riprodotta in modo più accurato. Questo obiettivo non era esplicitamente previsto nel progetto esecutivo, ma è divenuto ora concretamente perseguibile.

Un particolare successo è stato conseguito con la campagna di acquisizione nella zona di Città di Castello, svolta durante il primo anno di attività e finanziata per il 75% con i fondi del progetto. I dati acquisiti hanno permesso di ottenere nuove informazioni sia sulla geometria dei sistemi di faglia attivi sia sulla struttura crostale e sul bacino di Città di Castello. Questi dati hanno permesso l'elaborazione di curve di attenuazione dei valori di picco del moto del suolo calibrate per l'area e consentiranno nel terzo anno di attività di eseguire studi di dettaglio sulla risposta sismica locale e di calcolare attendibili scenari di scuotimento.

I risultati del progetto sono stati conseguiti con un buon coordinamento tra le diverse unità di ricerca che collaborano nei differenti tasks.