UNIONE EUROPEA

PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

REGIONE ABRUZZO

Attuazione dell'Art.11 della Legge 24 Giugno 2009, n. 77
Attivita' di Prevenzione del Rischio Sismico – Microzonazione Sismica del Territorio Regionale
Progetto Cofinanziato con Fondi Comunitari POR-FESR Abruzzo – 2007-2013 Asse IV – Attivita' IV 3.1

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione Illustrativa

Base topografica: CTR 1:5.000 fornita dal Servizio Cartografico della Regione Abruzzo – Sistema di Riferimento Geografico WGS 1984 Fuso 33N

REGIONE ABRUZZO

Comune di
Trasacco (AQ)

Validazione del
Tavolo Tecnico MZS

Tecnico incaricato: Dott. Geol. Michele Aureli

Collaboratore: Dott. Geol. Luca Gentile Lorusso

Data

1. Introduzione

2. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

3. Assetto geologico e geomorfologico dell'area

4. Dati geotecnici e geofisici

5. Modello del sottosuolo

6. Interpretazioni e incertezze

7. Metodologie di elaborazione e risultati

8. Elaborati cartografici

9. Confronto con la distribuzione dei danni degli eventi passati

10. Bibliografia

11. Allegati

1. Introduzione

Nell'ambito del programma regionale di mitigazione del rischio sismico, a seguito dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3907 del 13.11.2010 e della D.G.R. n. 333 del 20.5.2011 (seconda annualità), su incarico ricevuto dal Comune di Trasacco, si è svolto il presente studio di Microzonazione sismica di I livello del territorio comunale.

Il comune si colloca sul bordo sud occidentale della piana del Fucino in Provincia dell'Aquila ed è a pochi chilometri verso sud da Avezzano principale centro della Marsica.

L'attuale strumento urbanistico vigente è una "Variante Generale al vigente PRG approvato nel 1989" ed approvata dall'Amm.ne Provinciale con Delibera del Consiglio Provinciale n. 2 del 25/01/2001 e n. 49 del 9/08/2001, con successiva pubblicazione sul BURA n. 11 del 12/06/2002. Una successiva Variante Specifica è stata approvata per le Zone Agricole (L/R 12/99 e smi) con deliberazione del Consiglio Comunale n. 35 del 11/09/2006, pubblicata sul BURA n. 64 del 15/11/2006. Il regolamento edilizio vigente è stato approvato con deliberazione del consiglio Comunale n. 3 del 30/1/2006.

Il territorio si estende per circa 51,4 Kmq e ha attualmente una popolazione residente di 6252 abitanti con densità per Kmq di 121,63; si distribuisce oltre al centro urbano in due frazioni e località tra cui *Strada 37e 38 del Fucino*.

Gli effetti provocati dallo scuotimento sismico alle costruzioni e alle infrastrutture presentano spesso differenze sostanziali in centri abitati posti anche a piccola distanza tra loro, se non nell'ambito dello stesso centro abitato. L'entità del danno è certamente condizionata dalla qualità delle costruzioni, ma spesso le cause vanno ricercate in una differente pericolosità sismica locale, ovvero nella presenza di fenomeni di possibile amplificazione dello scuotimento legati alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area e di fenomeni di instabilità e deformazione permanente dei terreni.

Attualmente si tende ad analizzare preventivamente un territorio al fine di discretizzarlo in areali in cui le condizioni strutturali e litostratigrafiche sono tali da far attendere un comportamento, nei confronti dell'ampiezza dell'onda sismica, omogeneo in termini di amplificazione.

Tale analisi preliminare è nota con il nome di "microzonazione sismica" di un territorio e si contrappone al vecchio concetto di macrozone sismiche che coincidevano, impropriamente, con confini amministrativi piuttosto che con limiti geologici.

In tal senso il presente studio ha lo scopo di caratterizzare il territorio individuando e delimitando le aree a comportamento sismico omogeneo e risulta quindi fondamentale per una corretta pianificazione territoriale; l'obiettivo è quello di fornire elementi per la progettazione di nuove opere ed evidenziare la presenza di fenomeni di amplificazione dello scuotimento legati alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche locali.

La presente relazione illustrerà gli aspetti relativi agli elaborati cartografici prodotti al fine di agevolare la lettura dei dati e la valutazione delle risultanze.

Si descriveranno le caratteristiche litotecniche degli affioramenti e l'assetto stratigrafico con particolare riferimento alle indagini geofisiche e geotecniche che si sono utilizzate cosi come previsto dalla normativa nazionale e regionale (*linee guida regione Abruzzo versione 1.2, L'Aquila 30 Luglio 2012*) vigente e integrando i risultati secondo le Istruzioni Tecniche degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica.

Le aree rilevate sono state definite in accordo con gli amministratori e tecnici comunali, identificando le problematiche urbanistiche locali e proponendo una zonizzazione del territorio oggetto di analisi. Sono state considerate le zone che rappresentano gli ambiti di trasformazione di maggiore significato e delimitate in relazione all'ambito geologico e morfologico presente. Si sono escluse dall'analisi gli ambiti territoriali a vocazione e destinazione agricola e con valenza di tutela paesaggistica.

Nel dettaglio, si è tralasciato il settore ad occidente del torrente "*Fossato di Rosa*" e le dorsali di *Colle Torrazzo* e *Colle San Martino* al confine con il comune di Luco dei Marsi e si è delimitata l'area verso nord grossomodo in corrispondenza di "*Strada 37*" dove affiorano diffusamente i depositi lacustri del Fucino prettamente ad uso agricolo.

Partendo quindi dalla valutazione della pericolosità sismica di base e dalla descrizione dell'assetto geologico e geomorfologico dell'area, la presente relazione descrive le unità geologiche affioranti ponendo particolare attenzione ai depositi di copertura quaternari; si sono desunte le principali caratteristiche fisico-meccaniche e definito le diverse unità litotecniche.

Sulla base dei dati a disposizione e delle indagini svolte, con particolare riguardo ai dati desunti dalle misure di microtremore ambientale, si è definito il modello del sottosuolo locale.

In aggiunta si riportano le informazioni e considerazioni ritenute utili per l'analisi della risposta sismica locale e le interpretazioni che si sono avute nel corso dello studio nel definire ad esempio i limiti tra i diversi litotipi specie quando la vegetazione e le coperture antropiche ne mascherano i contatti.

Stralci planimetrici con esatta ubicazione, foto e risultati (grafici) delle indagini sono riportati nei paragrafi successivi per descrivere e illustrare gli affioramenti ritenuti più significativi.

2. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

La pericolosità sismica può essere definita come il livello di confidenza associato ad una proposizione del tipo: "In un futuro intervallo di tempo la località verrà interessata da almeno un evento sismico caratterizzato da un livello di scuotimento al sito ". Di fatto, la pericolosità esprime uno stato di incertezza sulla sismicità futura, incertezza dovuta alle incomplete conoscenze disponibili sul processo sismogenico presumibilmente responsabile dello scuotimento atteso.

La pericolosità varia in funzione dei tempi di ritorno attesi per un fenomeno ed è estremamente elevata per fenomeni ricorrenti con tempi bassi o con fenomeni potenzialmente distruttivi. Risulta evidente che assume una notevole importanza in senso pianificatorio e di predisposizione delle misure atte a mitigare l'effetto atteso sulle strutture e sulle attività antropiche. Oltre alla conoscenza della probabilità di accadimento di un evento sismico, che è funzione dell'assetto strutturale dell'area e della distanza dalle principali zone sismogenetiche, è necessario conoscere quali possano essere gli effetti cosismici che accompagnano l'evento naturale e, tra questi, la reazione del terreno in termini di amplificazione/smorzamento dell'onda sismica e la perdita o la modificazione delle sue caratteristiche statiche di resistenza.

In un generico sito la pericolosità di base deve essere descritta in modo da renderla compatibile con le NTC e da dotarla di un sufficiente livello di dettaglio, sia in termini geografici che in termini temporali; tali condizioni possono ritenersi soddisfatte se i risultati dello studio sono forniti:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima a_g e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale sopra definite;
- in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km);
- per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno T_R ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi.

La "pericolosità di base" costituisce quindi, l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche; le sue attuali fonti di riferimento sono indicate nel seguito del presente paragrafo.

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata, nei modi chiaramente precisati dalle NTC, per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente e dalla morfologia della superficie. Tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale.

Attualmente si tende ad analizzare preventivamente un territorio al fine di discretizzarlo in areali in cui le condizioni strutturali e litostratigrafiche sono tali da far attendere un comportamento, nei confronti dell'ampiezza dell'onda sismica, omogeneo in termini di amplificazione o di smorzamento. Allo stato attuale, la pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento è fornita dai dati pubblicati sul sito http://esse1.mi.ingv.it/..

Per trattare i problemi tecnico-amministrativi tipici della gestione del territorio, ogni regione può definire l'appartenenza di ciascun comune o porzione di esso ad una delle quattro zone sismiche definite più avanti, sulla base del valore massimo di un parametro di pericolosità sismica valutato all'interno dell'area considerata. In particolare, il parametro di pericolosità utilizzato è l'accelerazione orizzontale massima al suolo a_g, ossia quella relativa al 50simo percentile, ad una vita di riferimento di 50 anni e ad una probabilità di superamento del 10%.

Il comune di Trasacco è localizzato in un settore dell'Appennino Abruzzese ad elevata pericolosità sismica tanto che la nuova mappa classificativa prevede per il suo *bedrock* (o suolo rigido con V_s > 800 m/s) la probabilità di superamento del 10% in 50 anni di un valore convenzionale di accelerazione massima orizzontale (a_g) variabile da 0.225 a 0.275 *g* (*Fig.1*).

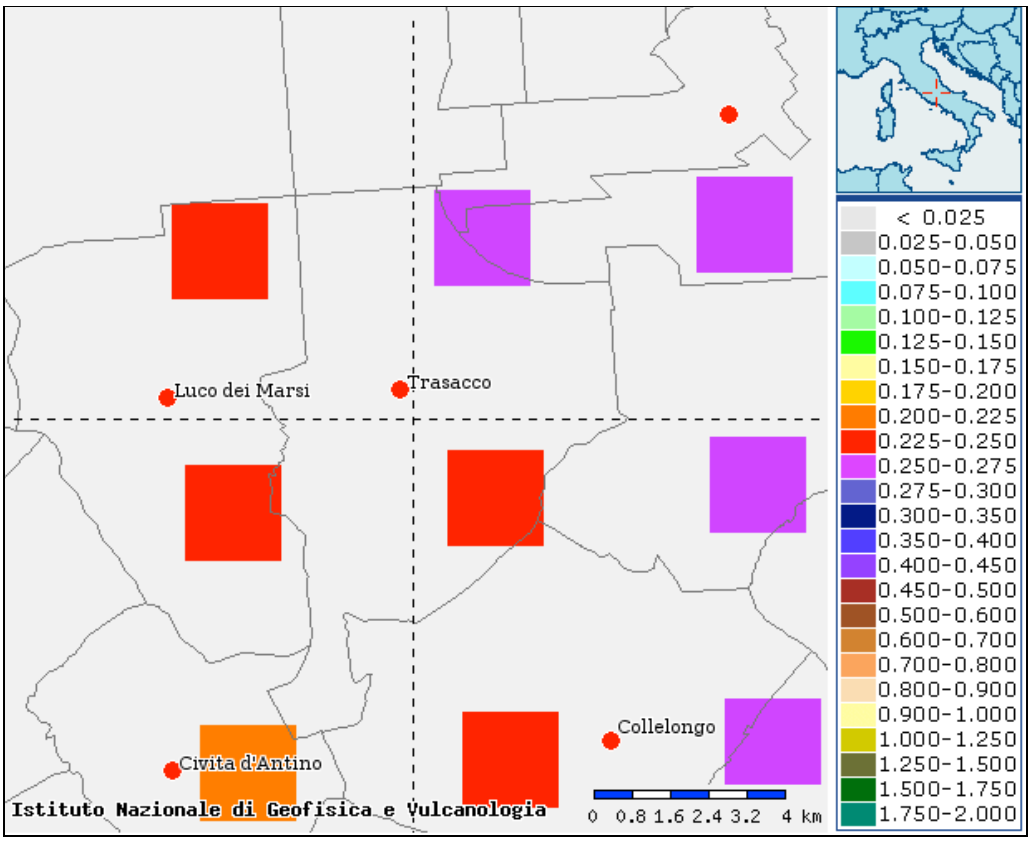
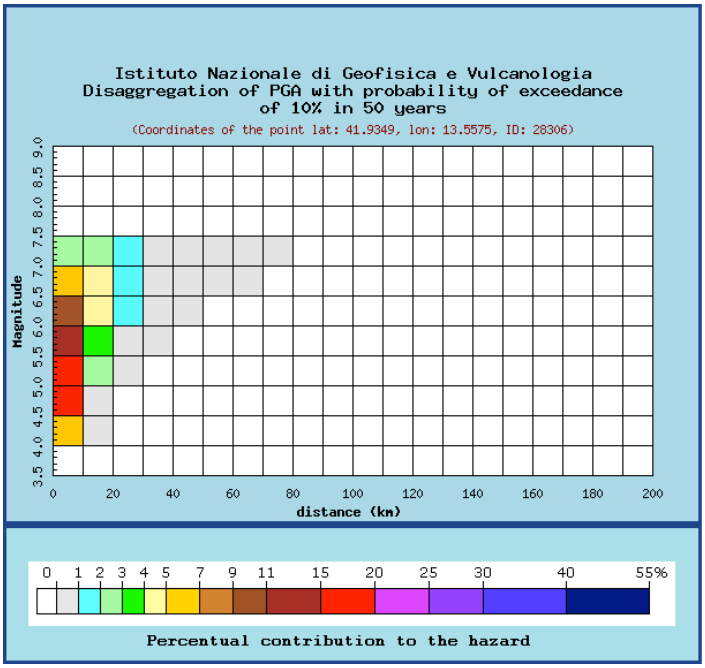


Fig.1. Ingrandimento della mappa di pericolosità sismica (da http://esse1-gis.mi.ingv.it/).

Nella figura 2 si riporta il grafico di disaggregazione (o deaggregazione) della pericolosità sismica che consente di valutare i contributi di diverse sorgenti sismiche alla pericolosità di un sito.

La forma più comune di disaggregazione è quella bidimensionale in magnitudo e distanza (M -R) che permette di definire il contributo di sorgenti sismogenetiche a distanza R capaci di generare terremoti di magnitudo M. Espresso in altri termini, il processo di disaggregazione in M-R fornisce il terremoto che domina lo scenario di pericolosità (terremoto di scenario) inteso come l'evento di magnitudo M a distanza R dal sito oggetto di studio che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del sito stesso. Analogamente alla disaggregazione in MR è possibile definire la disaggregazione tridimensionale in M -R -ε dove ε rappresenta il numero di deviazioni standard per cui lo scuotimento (logaritmico) devia dal valore mediano predetto da una data legge di attenuazione dati **M** ed **R** (*Bazzurro e Cornell, 1999*).



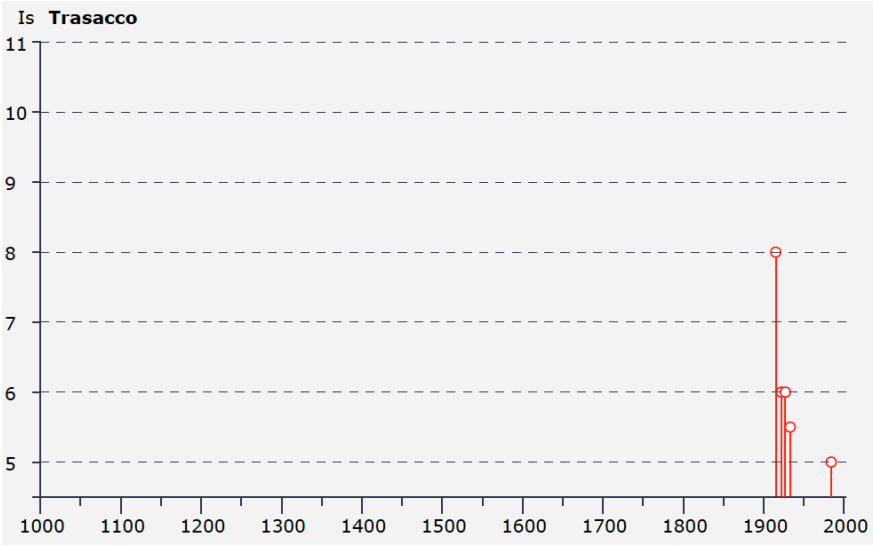
Valori medi		
Magnitudo	**Distanza**	**Epsilon**
5.610	7.810	0.922

Fig.2. Ingrandimento del grafico della disaggregazione del valore di ag con probabilità del 10% in 50 anni (da http://esse1-gis.mi.ingv.it/).

Si vuole ricordare l'importanza dell'analisi di disaggregazione nell'ambito di uno studio dettagliato della pericolosità sismica di un sito dal momento che studi di microzonazione, analisi di liquefazione, analisi di risposta sismica locale, studi di stabilità dei versanti necessitano la conoscenza dei parametri del terremoto di scenario.

I risultati riportati in questo studio, pertanto, possono risultare utili al fine di selezionare accelerogrammi per analisi dinamiche (es. analisi numeriche di risposta sismica locale).

Per valutare la pericolosità sismica di un luogo è necessario innanzitutto conoscere la sua storia sismica, quindi avere una lista dei terremoti che hanno colpito la zona quanto più completa ed estesa nel tempo. Per il comune di Trasacco, sono stati identificati 15 eventi dal 1000 al 2002 database macrosismico Italiano 2004, DBMI04 dell' INGV. L'intensità macrosismica massima osservata nel passato è attribuita al terremoto del 1915 quando l'area fucense ospitò il sisma più distruttivo di cui si abbia memoria storica nel territorio abruzzese (I_{max} 8); l'intensità macrosismica attribuita al terremoto verificatosi nella conca aquilana I_{2009} risulta essere pari a 5 (*Fig.3,4*).



Is	Anno	Me	Gi	Or	Mi	Area epicentrale	Np	Ix	Mw
NF	1895	11	01			CASTELPORZIANO	98	6-7	4.83
NF	1907	01	23	00	25	ADRIATICO CENTRALE	93	5	4.84
8	1915	01	13	06	52	AVEZZANO	1040	11	6.99
6	1922	12	29	12	22	SORA	102	7	5.60
4	1925	09	24	13	33	Molise occidentale	50	7-8	5.40
6	1927	10	11	14	45	MARSICA	77	7	5.27
5-6	1933	09	26	03	33	Maiella	326	9	5.68
NF	1960	03	14	04	44	MARSICA	40	7	5.17
4	1979	09	19	21	35	Valnerina	691	8-9	5.90
4	1980	11	23	18	34	Irpinia-Basilicata	1317	10	6.89
4	1983	08	12	19	36	ROCCHETTA A VOLTURNO	53	5	4.68
NF	1984	04	29	05	02	GUBBIO/VALFABBRICA	709	7	5.68
5	1984	05	07	17	49	Appennino abruzzese	912	8	5.93
NF	1990	05	05	07	21	POTENTINO	1374	7-8	5.84
NF	1998	08	15	05	18	MONTI REATINI	233	6	4.49

Fig. 3 Grafico e eventi illustranti la storia sismica di Ofena dal 1000 al 2002. Sono riportati i valori dell'intensità sismica al sito MCS (Is), numero di osservazioni macrosismiche del terremoto(Np), l'intensità massima (Ix), la magnitudo momento CPTI04Maw(Mw), not fealt (NF) da emidius.mi.ingv.it.

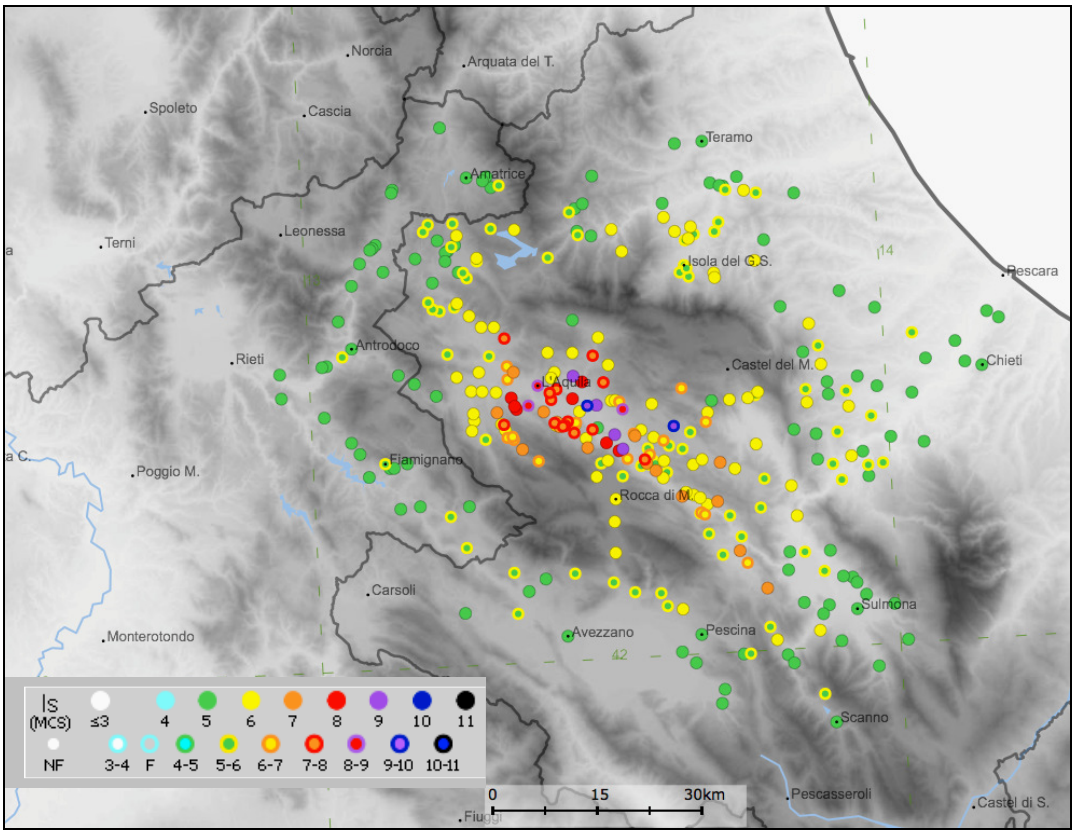
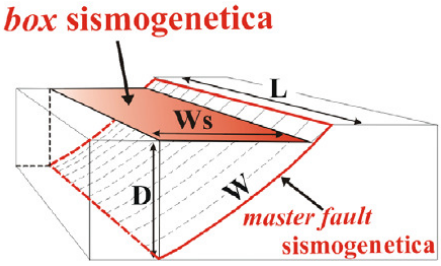


Fig. 4- Intensità macrosismiche del terremoto del 6 aprile 2009 (interfaccia Web di DBMI04).

Il territorio comunale è effettivamente attorniato da sistemi di faglie ritenute attive per molte delle quali esistono buone informazioni geologiche, sismologiche e geodetiche circa la loro attività; l'area fucense infatti, ha rappresentato una vera e propria palestra per studi geologici e geomorfologici in prospettiva neotettonica e paleosismologica. Nel settore meridionale ed occidentale della conca, dai numerosi studi consultati, sono meno evidenti gli indizi di un'attività tettonica quaternaria rispetto ai settori settentrionale ed orientale.

Dallo studio della pericolosità sismica dell'Abruzzo (*Lavecchia et al., 2006*) sono state identificate differenti province sismotettoniche, definite come ampi domini strutturali, omogenei in termini di tettonica attiva e quindi con un omogeneo potenziale sismogenetico. Il Fucino si colloca nella provincia sismotettonica Appenninica a cui viene riferita l'origine e la presente configurazione dei *graben* plio-quaternari. Questa provincia è caratterizzata da terremoti relativamente frequenti e di moderata magnitudo insieme a forti terremoti storici con lunghi intervalli di ricorrenza con magnitudo fino a 7 come il terremoto del 1915 che determinò anche notevoli effetti sull'ambiente, quali la formazione di scarpate di faglia (fagliazione di superficie cosismica), spaccature del terreno, vulcanelli di fango, frane, variazioni della topografia, variazioni chimico-fisiche delle acque e cambiamenti nelle falde acquifere (Castenetto & Galadini, 1999). La fagliazione del 1915 è stata riscontrata lungo le principali faglie caratterizzate da attività olocenica.

La distribuzione in profondità della sismicità risulta concentrata nella crosta superiore a profondità minori di 15 km (Boncio *et al.*,2004).Più nel dettaglio il Fucino ricade all'interno della *box sismogenetica n°16* cosi come definito dallo studio di pericolosità sismica della regione Abruzzo *(Fig.6)*. Le *box sismogenetiche* rappresentano la proiezione in superficie delle *master faults* e rappresentano quindi, ai fini della pericolosità sismica, delle vere e proprie sorgenti in grado di radiare energia sismica. All'interno della box si localizza l'epicentro del massimo terremoto atteso, la cui magnitudo è vincolata, tuttavia, dalle reali dimensioni 3-D della *master fault* (*Fig.5*).



master fault	giacitura in superficie (°)			dimensioni (km)				cinematica
	dir.	imm.	incl.	L	W	Ws	D	
Fucino	140	SW	55-65	25	17#	11	13 (R)	dip slip

Fig. 5- Rappresentazione tridimensionale di box sismogenetica: Ws=larghezza box in superficie;L= lunghezza lungo la direzione della master fault sismogenetica;W=lunghezza lungo l'immersione della master fault; D= spessore sismogenetico locale (i.e. massima profondità del piano di faglia sismogenetico).
Tab. 1- Parametri geometrici e cinematici della master faults n°16 del Fucino (da Lavecchia et al., 2006).

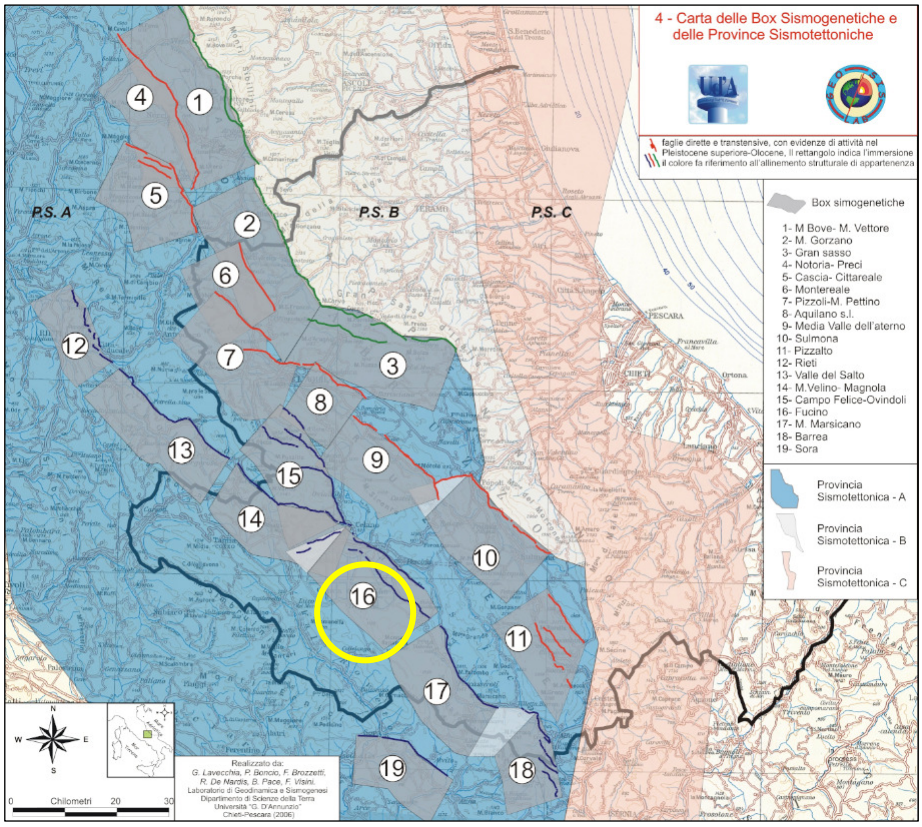


Fig. 6- Carta delle Box sismogenetiche e delle Province sismotettoniche; nel cerchio in giallo il settore del Fucino (Lavecchia et al.,2006).

Una quantificazione della probabilità di occorrenza di eventi di magnitudo superiore al grado 5.5 Richter in Italia, nei prossimi dieci anni, è deducibile dalla mappa proposta e aggiornata al 4 gennaio 2012 dell'INGV dove per l'area di pertinenza, che ricade nel poligono n°36 (*Abruzzo aree interne*) è previsto un valore del 15,8 % (*Fig.7*).

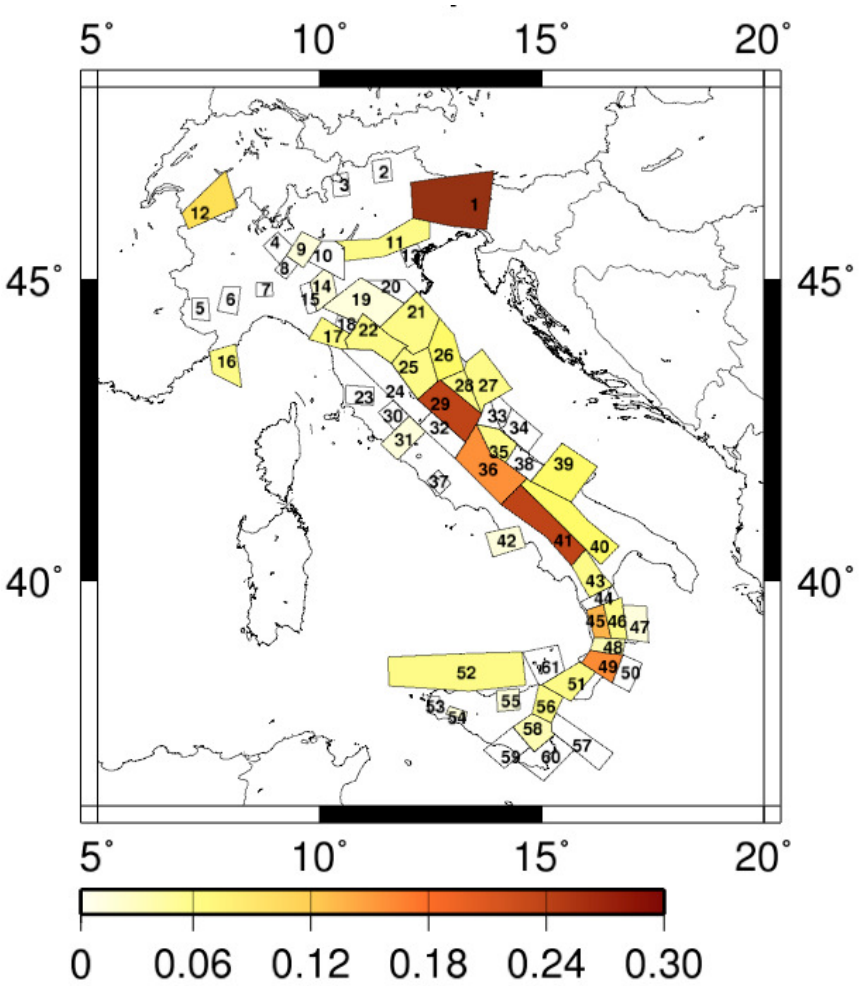


Fig.7 Mappa della probabilità di occorrenza di terremoti nei prossimi 10 anni (dati Ingv).

Da quanto sin ora detto, si evince che Trasacco è potenzialmente esposto ad un livello di pericolosità sismica alto per cui si rende necessario uno studio di microzonazione sismica per stimarne la risposta sismica locale e, di conseguenza, a valutare nel dettaglio il livello di rischio sismico cui è soggetta.

A tale scopo è innanzitutto importante raccogliere informazioni circa l'assetto geologico-strutturale e geomorfologico dell'area, nel tentativo di definire al meglio un modello del sottosuolo di partenza e/o confronto per eventuali tecniche sperimentali e più sofisticate di analisi successive.

3. Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Il comune di Trasacco si colloca sul bordo sud occidentale della Piana del Fucino in Provincia dell'Aquila e ricade nel foglio ovest – quadrante 152 IV NO della Carta Geologica dell'Abruzzo in scala 1:100000 edita da Vezzani L. e Ghisetti F. *(Fig.8)*.

Il bacino del Fucino è una delle maggiori depressioni intramontane (circa 200Kmq) dell'Appennino, situata ad una quota compresa tra 650 e 680 m s.l.m. La sua origine è legata alla tettonica estensionale pliocenica e quaternaria che seguì ad una fase deformativa compressiva tardo messiniana-pliocenica inferiore.

La geometria della piana è stata causata dall'orientazione dei lineamenti tettonici principali che disarticolano sia le strutture carbonatiche circostanti che i depositi plio-quaternari di riempimento.

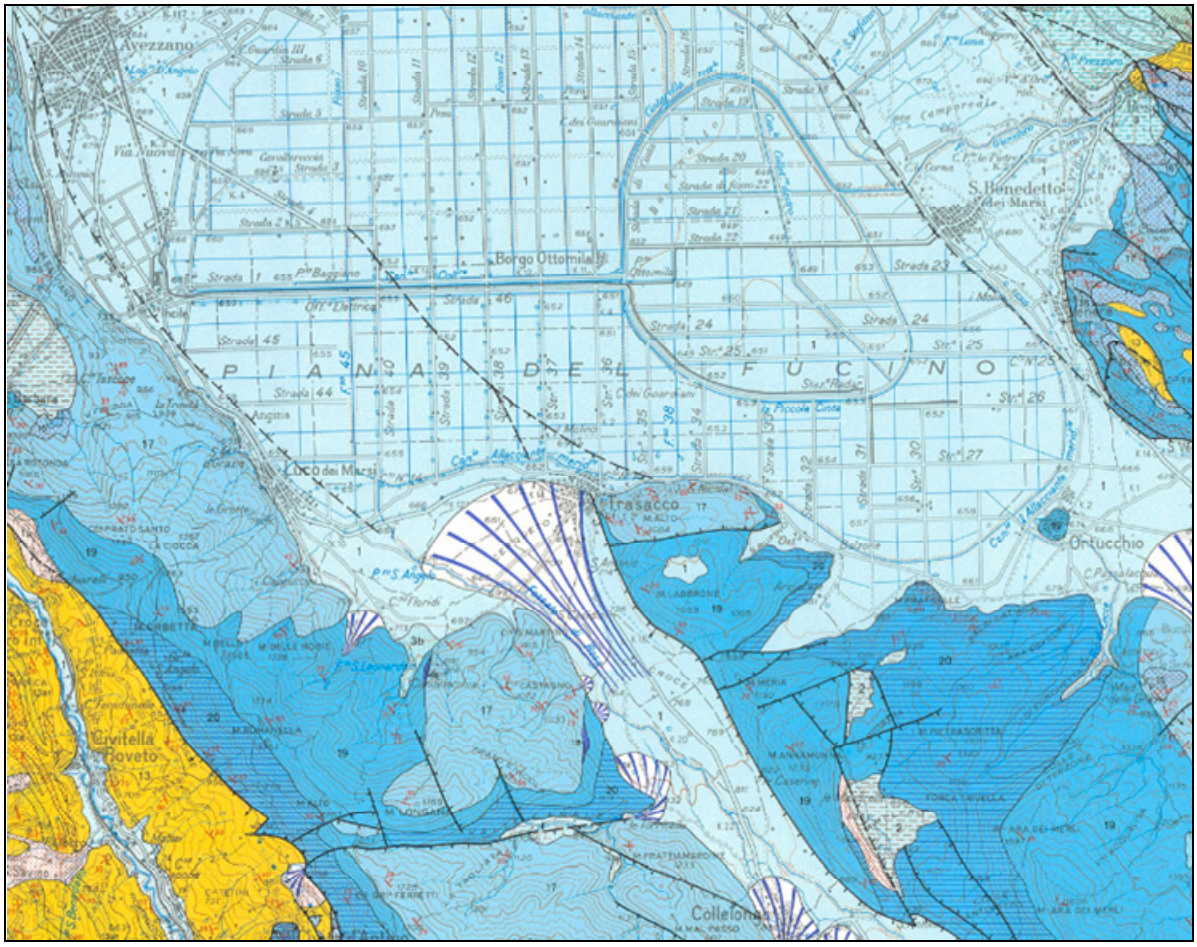
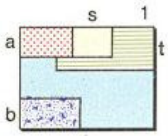
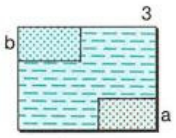


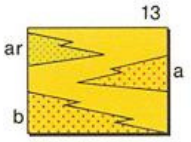
Figura 8a. Stralcio carta Geologica d'Abruzzo (da Carta Geologica d'Abruzzo L. Vezzani & F. Ghisetti).



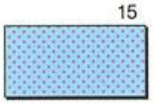
Depositi lacustri argilloso-limoso-sabbiosi; depositi fluviali e fluvio-glaciali prevalentemente ghiaioso-sabbiosi; travertini (1). Depositi sabbiosi delle piane costiere (s). Depositi alluvionali terrazzati (t). Detriti di falda e coperture detritico-colluviali; depositi residuali; terre rosse (a). Sedimenti morenici (b). *Olocene - Pleistocene superiore*.



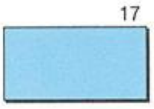
Depositi lacustri argilloso-limoso-sabbiosi; depositi fluviali prevalentemente ghiaioso-sabbiosi. *Pleistocene medio p.p.- Pliocene?* Brecce calcaree stratificate e ben cementate, con matrice calcarea generalmente rosata (b). *Pleistocene inferiore*. Successione costituita da depositi lacustri argilloso-limosi e sabbiosi passanti verso l'alto a ghiaie e sabbie con lenti di brecce calcaree a tessitura caotica, contenenti blocchi di dimensioni fino a migliaia di metri cubi (a). *Pliocene.*



Flysch della Val Roveto. Alternanza pelitico-arenacea con bancate arenacee decametriche (ar, Val Roveto), con lenti di puddinghe poligeniche con clasti di arenarie, di calcari tipo "pietra paesina", e di rocce eruttive (a, Canistro) talora appoggianti in discordanza sul substrato carbonatico (Serra S. Antonio, M. Piano), e con intercalazioni di brecce calcaree tipo Brecce della Renga nei livelli inferiori (b); feltri interstratali a piccoli cristalli di gesso (CASTORINA et al., 1996) in prossimità della faglia della Val Roveto, nei pressi di Petrella Liri. Spessore: fino a 800-1000 m. *Messiniano*.



Calcareniti a Briozoi e Litotamni. Calcareniti biancastre massicce costituite da *grainstones, rudstones e packstones* con Pectinidi, Briozoi, Coralli, Litotamni, *Miogypsina* spp., *Amphistegina* spp., passanti verso l'alto a calcareniti marnose glauconitiche di colore grigio-giallastro. Spessore: 100-200 m. *Serravalliano - Langhiano.*



Calcari biancastri a Radiolitidi. *Mudstones-wackestones* con rare intercalazioni di *grainstones-rudstones* bioclastici, con orizzonti ricchi in Radiolitidi. Microfaune a *Cisalveolina fraasi* e *Dicyclina schlumbergeri*. Spessore: 1000-1200 m.
Senoniano - Cenomaniano superiore.

Calcari in grosse bancate, composti da *mudstones* o da *wackestones* a peloidi, Ostracodi e Miliolidi, talora con orizzonti ricchi di oogoni di Characee e, nella parte alta, calciruditi a frammenti di Rudiste, con intercalazioni di brecce a clasti neri. Alla base argille marnose verdastre ("Livello ad Orbitolina"). *Cenomaniano superiore - Aptiano*. **Calcari a Bird's-eyes**. Calcari di colore biancastro in strati e banchi spessi da 40 cm a 2 m. Microfaune a *Clypeina jurassica* e *Salpingoporella annulata*. Spessore totale: 1200-1300 m.
Cretaceo inferiore p.p.- Titonico p.p.?

Unità calcareo-dolomitica. Calcari e calcari debolmente dolomitici di colore biancastro in banchi da 50 cm a 2 m, a volte con cicli a carattere peritidale, composti da *wackestones* e *packstones* a Coralli, Alghe, peloidi, oncoidi, bioclasti ed intraclasti, con intercalazioni di *grainstones* ad ooliti e bioclasti, e con livelli ad *Ellipsactinia* nella parte alta. Faune a *Pfenderina salernitana e Protopeneroplis striata*. *Titonico p.p.? - Dogger p.p.* Calcari in banchi da 1 a 4 m composti da *grainstones* oolitici con intercalazioni di *wackestones* a spicole di Spugna. Spessore totale: 800-900 m. *Dogger inferiore? - Lias superiore.*

Figura 8b. Stralcio legenda (da Carta Geologica d'Abruzzo L. Vezzani & F. Ghisetti).

Le successioni fondamentali che caratterizzano la Conca del Fucino, possono essere così riassunte:Depositi del substrato marino Meso-Cenozoici; Depositi Quaternari Plio-Pleistocenici.

L'ossatura della dorsale dei versanti retrostanti il comune è costituita da litologie calcaree riferibili al Cretacico che in alcuni tratti sono coperte da depositi residuali e terre rosse. La stratificazione non è sempre evidente e la roccia si presenta a tratti massiva a vario grado di fratturazione e interessata localmente da forme carsiche.

I sedimenti continentali sono rappresentati da brecce, sedimenti lacustri, fluvio-lacustri e fluvio-glaciali; essi costituiscono complessi stratigraficamente ben definiti e variamente incassati l'uno nell'altro. Recentemente sono stati riuniti in unità (Centamore et alii, 2006; APAT, 2006) tenendo conto di importanti elementi di separazione (discordanze, paleosuoli) direttamente visibili sul terreno o estrapolabili in base a considerazioni stratigrafiche e geomorfologiche. Sono state in tal modo individuate, oltre ai depositi olocenici, anche due sintemi e un supersintema:

1) Supersintema di Aielli-Pescina (comprendente depositi attribuibili al Pliocene? – Pleistocene medio);

2) Sintema di Catignano (riferibile nel complesso al Pleistocene medio finale)

3) Sintema di Valle Majelana (riferibile nel complesso al Pleistocene superiore) con superficie sommitale corrispondente a quella topografica, quando l'unità non è ricoperta da depositi olocenici, e superficie basale corrispondente ad una fase di erosione fluviale o ad una fase di alterazione pedologica dell'ultimo Interglaciale (Centamore et alii, 2006).

Nel settore settentrionale dell'area di studio sono presenti sedimenti di origine lacustre di varia litologia e facies: dai limi argillosi tipici delle parti più profonde del lago, alle facies sabbioso-ghiaiose e ghiaiose tipiche delle spiagge e dei cordoni litorali.

Sono presenti inoltre depositi di origine fluviale-deltizio e colluviale che si sono deposti all'interno dell'alveo durante l'abbassamento del livello lacustre. Ai margini del limite del lago storico affiorano depositi lacustri prevalentemente ghiaioso sabbiosi, di facies litoranea, sia depositi alluvionali e conoidi formati dagli apporti fluviali e torrentizi; la zona meridionale è costituita da estesi accumuli di ghiaie di origine fluvio-glaciale provenienti dalla testata della Vallelonga con intercalazione di inclusi litoidi.

Dal punto di vista tettonico, il territorio è attraversato da importanti discontinuità tettoniche come quella nota in letteratura come "*Faglia di Trasacco*" la cui documentata attività sembra produrre una abbassamento della porzione sud-occidentale e interessa parte della piana che coincide con l'alveo del lago storico (TF in *Fig.9*).

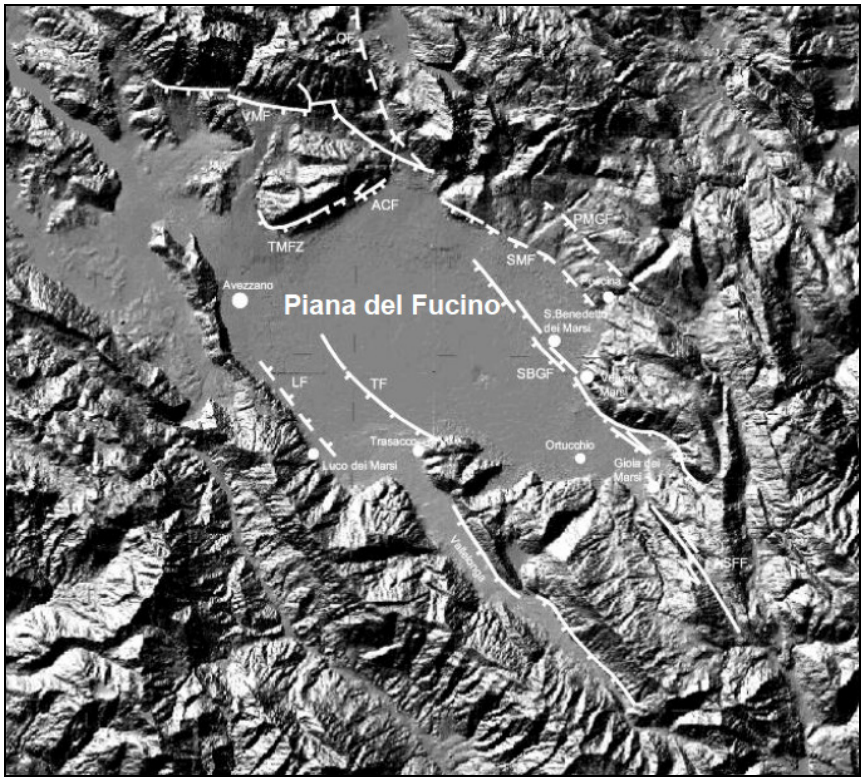


Figura 9. Schema delle principali faglie ad attività quaternarie presenti nel Fucino (Saroli et al.2008).

La faglia viene prolungata in Vallelonga, dove però non appare attiva almeno a partire dalla formazione della conoide fluvioglaciale tardo-pleistocenica. La faglia della Vallelonga (*Fig.10*) è stata responsabile dell'evoluzione quaternaria della depressione da essa bordata, sostanzialmente un'ampia valle che drena verso la Piana del Fucino. In base a dati geofisici (Ente per la Valorizzazione del Fucino, 1957), la depressione della Vallelonga è riempita da circa 150-200 metri di depositi continentali e l'assetto strutturale del bacino può essere assimilato ad un *semi-graben*.

La faglia è tuttavia sigillata da depositi alluvionali del Pleistocene superiore nel settore settentrionale. Inoltre, depositi di conoide alluvionale probabilmente riferibili al Pleistocene medio, alimentati dal versante sinistro della valle, mostrano una giacitura primaria senza alcuna evidenza di deformazione indizio dell'assenza di attività tardoquaternaria lungo il tratto meridionale della faglia della Vallelonga (Giraudi,1988).

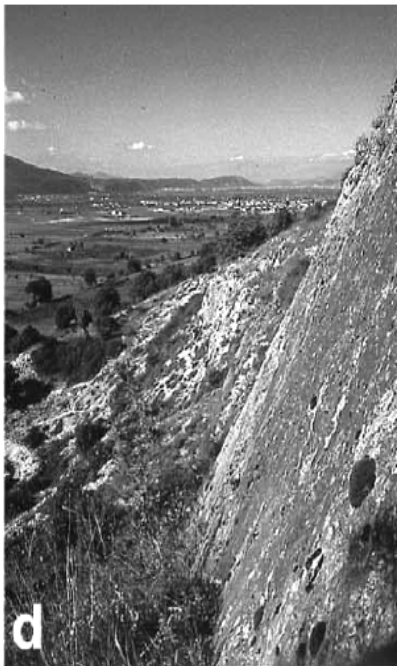


Figura 10. Particolare della faglia bordiera della Vallelonga (NW-SE striking); sullo sfondo l'abitato di Trasacco (da Cavinato et al. 2002).

Le caratteristiche litotecniche di dettaglio dei depositi alluvionali quaternari affioranti diffusamente nel territorio saranno descritte nei paragrafi successivi. In linea generale il settore distale della conoide è cara Nel dettaglio, i depositi alluvionali e di conoide sono costituiti da materiali ghiaiosi in matrice sabbiosa con intercalazioni di lenti limose e limoso-argillose.

In fase di rilevamento, attraverso uno sbancamento presente nella zona commerciale (località "*Volpare*" si sono potuti osservare i caratteri litotecnici dei depositi presenti e definirne le principali caratteristiche (*Fig.11*).

Nel dettaglio, dopo circa un metro di terreno vegetale ciottoloso, i sedimenti sono costituiti da ghiaie e ciottoli sub-arrotondati in matrice sabbiosa, intercalata da geometrie lenticolari di depositi limoso-sabbiosi avana.

La natura dei ciottoli che compongono la frazione più grossolana dei depositi che si incontrano in località "*Volpare*" e risalendo la valle verso sud è legata alle strutture carbonatiche affioranti ai margini di Villavallelonga.

Figura 11. Particolare di uno sbancamento eseguito in località "Volpare" ove si osservano depositi ghiaiosi con intercalazioni sabbiose e sabbioso-limose avana tipici di una messa in posto tipo conoide alluvionale.

I caratteri geomorfologici prevalenti nell'area del Fucino sono i fenomeni di accumulo sedimentario rispetto a quelli di erosione, che si sono trattenuti nella parte più depressa della conca. Tuttavia, le forme legate a fenomeni di prevalente erosione hanno una loro rilevanza per la fascia di territorio che circonda l'alveo lacustre bonificato.

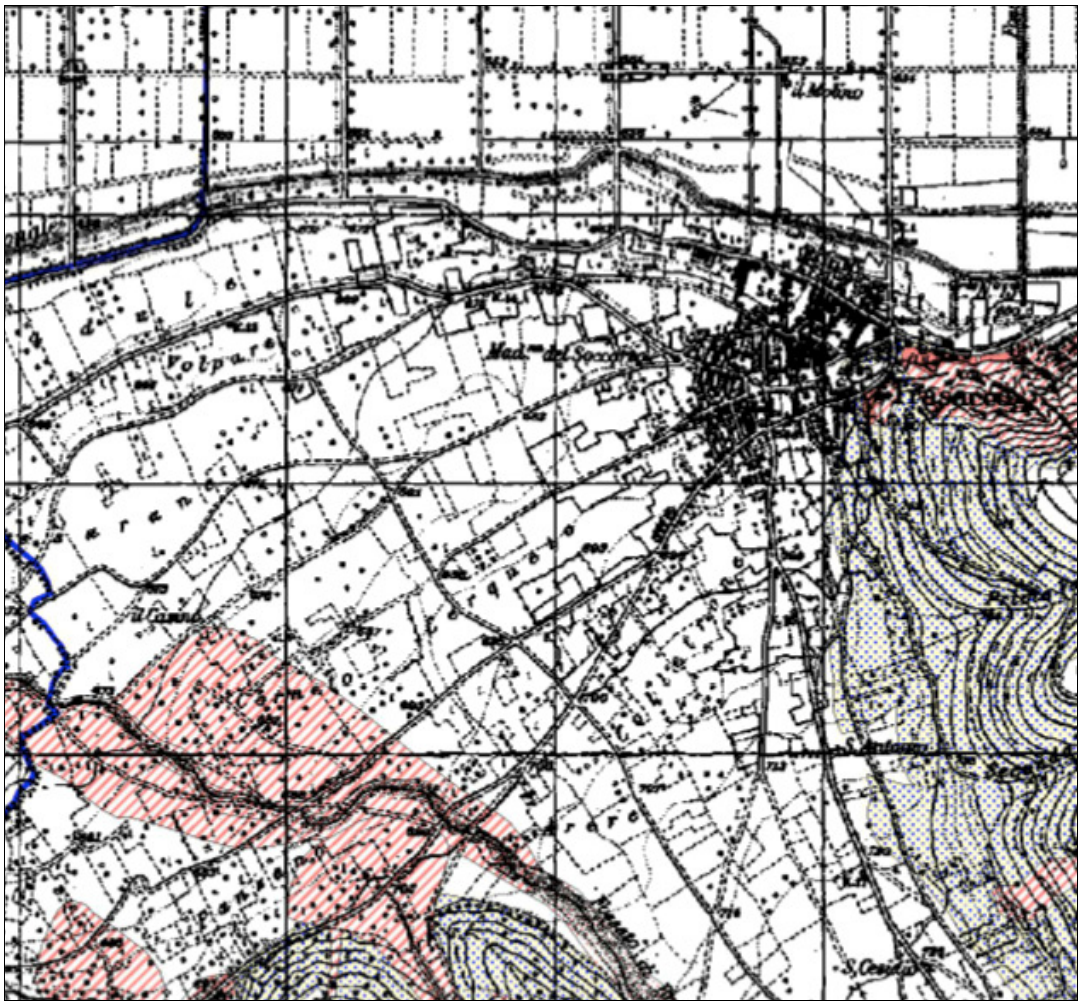
I processi e le forme dovute alle acque correnti superficiali, erosive e deposizionali, sono ben rappresentati infatti gran parte dell'area di studio si colloca sulle porzioni distali di un'ampia conoide che dal settore settentrionale di Collelongo si estende fino a località "*Volpare*" e presenta un andamento topografico debolmente degradante verso Nord. Altre forme simili si individuano in corrispondenza dello sbocco dei solchi di ruscellamento concentrato come ad esempio "*Primo Vallone*" impostatosi su una linea di discontinuità tettonica della dorsale "*M.Alto-M.Labbrone"* ; queste conoidi risultano di dimensioni più piccole e con pendenze di circa 8°-10° denotando bacini di alimentazione ridotti e una messa in posto di materiali detritici più grossolani.

Il corso d'acqua "*Fossato di Rosa*" a carattere torrentizio incassato nei depositi di conoide, è testimone di passati episodi erosivi; l'andamento mutevole dei deflussi tra una piena e un'altra ha dato luogo ad un alveo a rami intrecciati che nel tempo è "migrato" lateralmente verso le zone più depresse.

Dall'analisi comparata delle carte prodotte dal P.A.I. "*Liri Garigliano Volturno*" di pericolosità e rischio di frana (*Fig.11*), alcuni settori ricadono nelle classificazioni proposte.

Nel dettaglio lungo l'alveo del "*Fossato di Rosa*" è cartografata un "*Area di Alta Attenzione*" (A4) non urbanizzata dove si applicano i divieti e le prescrizioni previsti nell'Art.4 delle Norme di Attuazione e misura di Salvaguardia del P.A.I. (L.183/89). I versanti carbonatici sono classificati come "*Aree di possibile ampliamento dei fenomeni franosi cartografati all'interno, ovvero di fenomeni di primo distacco*" (C1) dove gli interventi sono subordianti unicamente all'applicazione della normativa vigente in materia, con particolar riguardo al rispetto delle disposizioni contenute nel D.M. 11/3/1988, nella Circolare LL.PP. 24/9/88 n. 3483 e succ. norme e istruzioni e nel D.P.R. 6/6/2001 n. 380.

La consultazione di questi elaborati, insieme con quelli del Progetto IFFI, ha costituito un punto di partenza primario per la definizione delle aree in cui concentrare il rilievo di campagna dal quale si è dedotto lo stato di attività dei processi morfoevolutivi segnalati.



AREA A RISCHIO MOLTO ELEVATO - R4
Nella quale per il livello di rischio presente, sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche.
*(* Aree a rischio molto elevato ricadenti in zone a Parco)*

AREA DI ALTA ATTENZIONE - A4
Area non urbanizzata, potenzialmente interessata da fenomeni di innesco, transito ed invasione di frana a massima intensità attesa alta.

Area di possibile ampliamento dei fenomeni franosi cartografati all'interno, ovvero di fenomeni di primo distacco, per la quale si rimanda al D.M. LL.PP. 11/3/88 - **C1**

Figura 11. Stralcio Foglio 152-4, Rischio di Frana (PAI Liri,Garigliano,Volturno).

A monte di "*Via Circonfucense*" si sono riconosciute porzioni di versante interessate da crolli e ribaltamenti in stato quiescente.

La messa in moto di tali blocchi è condizionata dalla giacitura dei piani di stratificazione o dall'intersezione dei *sets* di fratture che li delimitano rispetto alla direzione del fronte del versante lungo il quale risultano esposti. I crolli hanno provocato e possono provocare la caduta di blocchi e rilasci di materiale detritico che vanno a costituire il detrito di falda presente al piede dei versanti. Allo stato attuale le falde di detrito cartografate mostrano una generale condizione di stabilità testimoniata anche dalla vegetazione spontanea che ha radicato. Un fattore che non deve essere trascurato è l'aumento dell'inclinazione del pendio che si verifica per effetto di lavori di scavi e di sbancamento effettuati in corrispondenza delle falde costituite da depositi con forti variazioni granulometriche e che contengono intercalati suoli, livelli vulcanici e resti archeologici sparsi. Questo scenario può costituire un fattore predisponente alla mobilizzazione delle coperture. Processi carsici dovute alla solubilità della roccia calcarea caratterizzate da grotte, scanellature, inghiottitoi e doline sono ben riconoscibili; grotta "*Continenza*" ricca di speleotemi e la caratteristica "*Fossa Lapidaria*" ne sono una chiara evidenza.

Figura 12. a) Particolare del versante a monte di Via Circonfucense e della fascia di raccordo costituita dalla falda detritica; si possono riconoscere porzioni della parete intensamente fratturata interessata da crolli e forme carsiche epigee; b) sbancamento che mostra le caratteristiche dei litotipi che costituiscono la falda detritica variabili da fini a grossolani.

A valle di "*Via Monte Grappa*" lungo il versante a ridosso dell'abitato si individuano detriti di falda con spessore variabile che fanno da raccordo e con i depositi alluvionali ghiaiosi e con le coperture eluvio-colluviali sottostanti; allo stato attuale tale fascia detritica non mostra segni di instabilità (*Fig.13*).

Figura 13. Versante calcareo retrostante il centro urbano a valle di "Via Monte Grappa".

In alcuni studi si sostiene la presenza di diversi fenomeni di *sinkhole* originatisi dopo il 1876, anno in cui iniziò la bonifica del lago che in epoca storica occupava la piana, ma tuttora in formazione come testimoniato da sprofondamenti dell'aprile del 2009; gli autori segnalano tali fenomeni nei pressi del confine comunale settentrionale in prossimità di "*Borgo Ottomila*". I possibili meccanismi genetici sono da mettere in relazione o a fenomeni di liquefazione di orizzonti superficiali di granulometria medio-fine saturi o a fenomeni di "*piping*" più profondo connesso ai sistemi di faglie e fratture presenti (Caramanna et al.,2008; Nisio et al.2007).

Dal catalogo di P. Galli è emerso come diversi siti nella piana fucense sono stati interessati da fenomeni di liquefazione a seguito di eventi sismici. Considerata l'elevata sismicità del territorio, e la presenza di orizzonti sabbiosi saturi ricadenti in una buona fascia dell'area di studio, in concomitanza di futuri eventi sismici non si esclude la possibilità che si generano altri avvenimenti simili.

4. Dati geotecnici e geofisici

I dati di base disponibili sono stati raccolti e opportunamente selezionati. Si tratta di indagini eseguite da privati per progetti di nuove edificazioni o di ristrutturazione di costruzioni esistenti eseguite dalla società AURELI SOIL S.N.C..

Nel complesso le indagini sono risultate soddisfacenti per la caratterizzazione geotecnica e sismica dell'area. L'esatta ubicazione è riportata nella carta delle indagini.

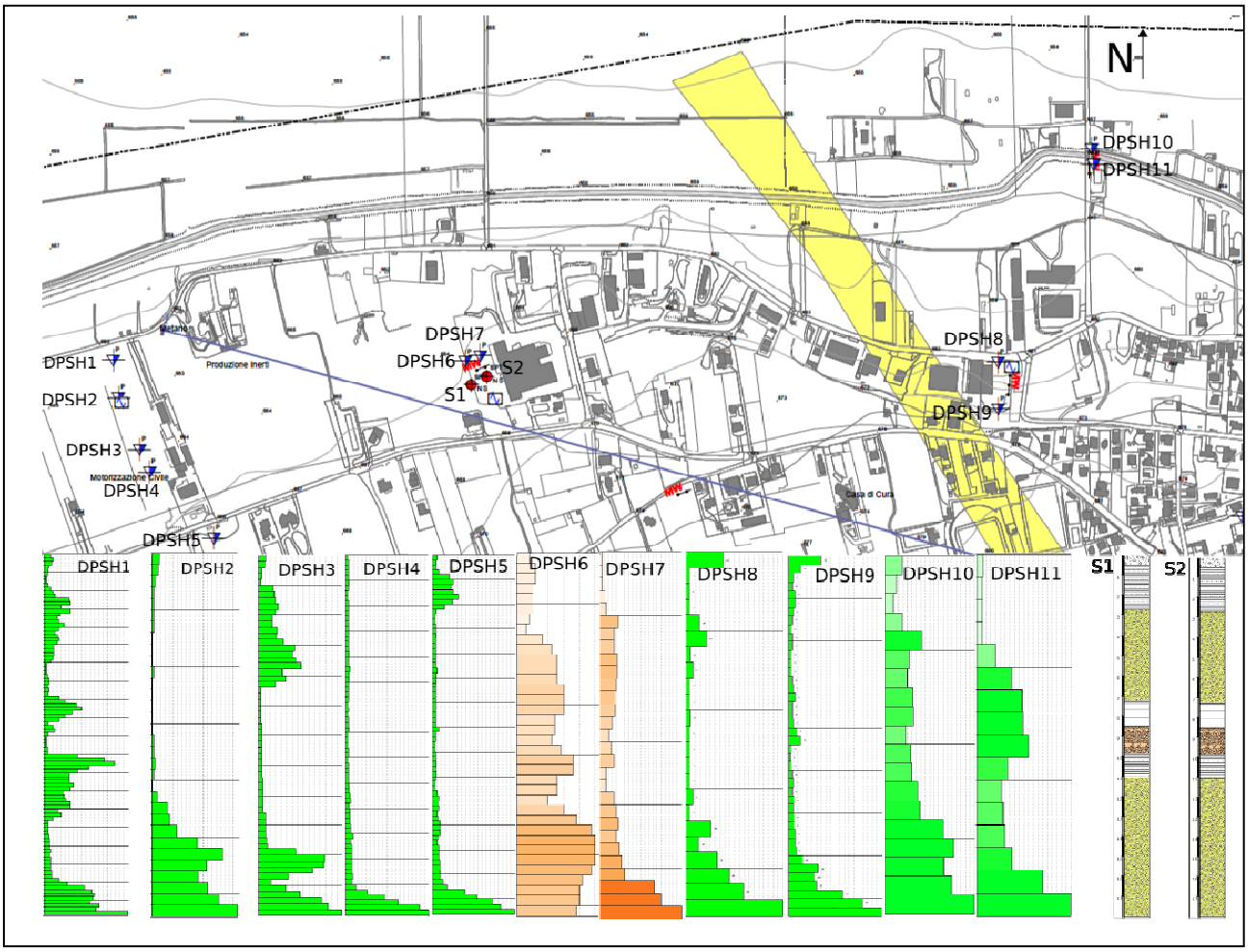
Sono disponibili prove geotecniche in sito principalmente n°16 prove con penetrometro pesante (DPSH) e n°2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo con prove di laboratorio e prove Standard Penetration Test (SPT) in foro; in alcuni siti è stato possibile rilevare la quota piezometrica. Diverse stazioni geomeccaniche effettuate nel corso dello studio hanno permesso una classificazione dei fronti rocciosi e determinare il grado di fratturazione *Jv* (*Volumetric Joint Count* - ISRM,1978).

Relativamente alla banca dati della L.464/84, realizzata e gestita dal Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico dell'ISPRA, nel territorio ricadono diverse perforazioni con stratigrafie. Si vuole specificare che queste stratigrafie sono estremamente sintetiche e a volte di difficile interpretazione e quindi affette da un certo margine di incertezza e pertanto si sono consultate per avere una stima degli spessori delle coltri quaternarie e della profondità della falda.

Le prove penetrometriche dinamiche tipo DPSH si sono effettuate per mezzo di penetrometro TG63-200 PAGANI con peso della massa battente di 63,5 Kg e altezza di caduta libera di 0,75 m.

I sondaggi geognostici eseguiti dalla ditta ICOFOND S.R.L. nel Novembre 2011 non hanno raggiunto il substrato e si sono spinti fino a 15 e 18 metri dal p.c. attraversando depositi alluvionali costituiti da ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose con intercalazione di livelli coesivi argilloso-limosi. In corrispondenza degli orizzonti coesivi, precisamente a 7,5 metri e 8 metri dal p.c., si sono prelevati dei campioni indisturbati con campionatore di tipo Shelby su cui si sono effettuate prove di laboratorio da parte della società SOGEA S.R.L.: analisi granulometrica, limiti di Atterberg, prova di taglio e prova edometrica (in allegato la sintesi dei risultati). Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni investigati dai sondaggi sono disponibili n°3 prove SPT nel sondaggio S1 e n°1 prova SPT nel S2 (*Fig.14*); le prove SPT sono state eseguite utilizzando il maglio di sganciamento automatico e il campionatore standard tipo Raymond con scarpa aperta. I fori si sono attrezzati con piezometro e si è pertanto rilevata la quota piezometrica; nel corso dei rilievi è emerso come la falda superficiale si attesta ad una quota di circa 9 metri di profondità con oscillazioni in concomitanza del regime delle precipitazioni. A protezione dei fori così strumentati sono stati messi in opera chiusini metallici protettivi muniti di lucchetto.

.



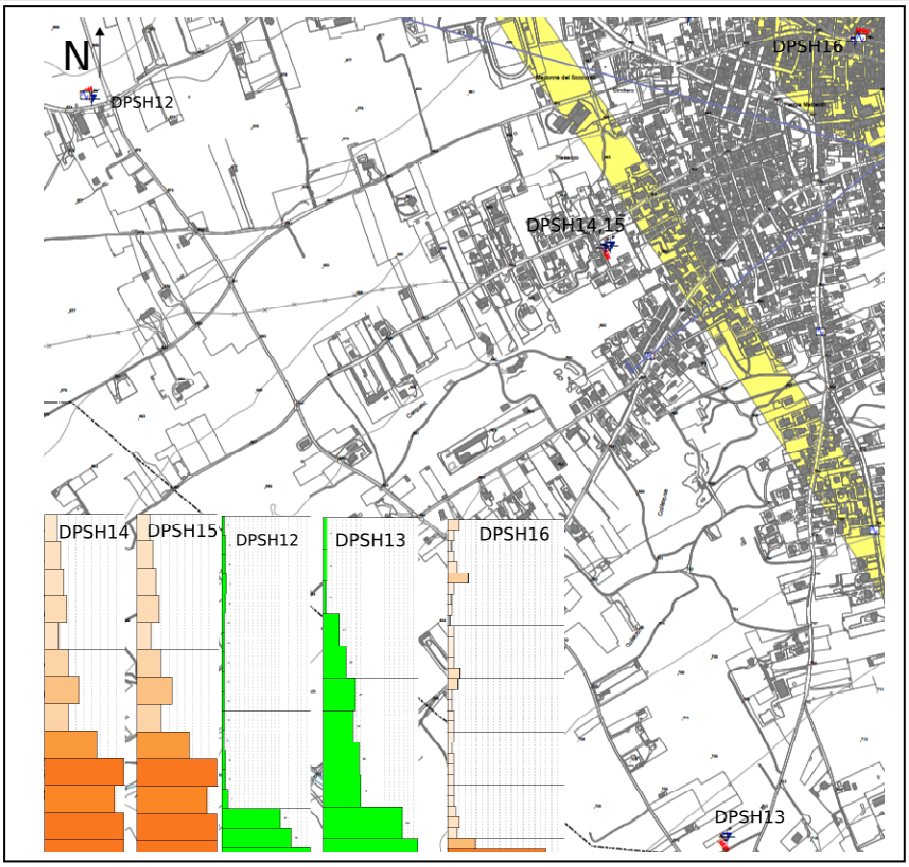


Figura 14,15. Indagini geotecniche in sito con grafici penetrometrie DPSH e log dei sondaggi con relativa ubicazione.

Le prove penetrometriche dinamiche tipo DPSH ubicate nel settore settentrionale dell'area mostrano delle variazioni in termini di resistenza alla penetrazione riconducibile alle frequenti alternanze presenti tra i depositi ghiaioso-sabbiosi e le lenti di litotipi a granulometria più fine argillosi e limosi. Una sostanziale omogeneità si è riscontrata invece per altre 4 prove penetrometriche (DPSH 12,13,14,15) effettuate più a sud che denotano litotipi con caratteristiche litotecniche più uniformi pressoché ghiaiosi e con buon grado di addensamento considerato che dopo circa 2 metri si è raggiunto il rifiuto strumentale; la prova DPSH 16 al contrario, ubicata in "*Via Bafile"* nei pressi del centro storico, ha attraversato circa 6 metri di depositi colluviali e di alterazione per lo più sciolti con scarse caratteristiche geomeccaniche per poi incontrare litotipi dotati di alta resistenza alla penetrazione probabilmente di natura litoide. In figura 14 e 15 si riportano i grafici delle penetrometrie e i log dei sondaggi eseguiti in prossimità della strada Circonfucense in "*Via Fossa di Villa*".

Attraverso l'analisi e la sintesi dei valori di resistenza alla penetrazione registrati nel corso delle indagini in sito delineate, dalle stazioni geomeccaniche effettuate sui litotipi calcarei e da dati bibliografici disponibili si sono potute differenziare diverse unità litotecniche e attribuire a ciascuna proprie caratteristiche meccaniche.

Di seguito si riportano i principali parametri, angolo di attrito e peso di volume, desunti da una media pesata dei diversi dati a disposizione ritenuti rappresentativi e al tempo stesso cautelativi; una descrizione per ogni unità geotecnica contribuisce a definire meglio i caratteri fisico-meccanici.

- **Litotipi lacustri (lac-E7IIId)**

Coesione non drenata *Cu (Kg/cm^2)*	**Ang. di attrito** *(°)*	**Peso di Volume** *(t/m^3)*	**Peso di Volume Saturo** *(t/m^3)*
0.2-0.3	**20-22**	**1.5-1.7**	**1.7-1.8**

Il grado di consistenza dei litotipi a granulometria fine e le caratteristiche meccaniche aumentano con la profondità specie quando a tali depositi si trovano intercalati orizzonti ghiaioso sabbiosi.

Si tratta, quindi, di materiali relativamente poco addensati, dotati di modesta resistenza al taglio, e di compressibilità generalmente elevata; la permeabilità per porosità è da considerarsi nell'insieme piuttosto bassa (*K* circa $1*10^{-7}$–$1*10^{-8}$). Orizzonti torbosi e sostanze organiche si possono trovare intercalati.

Il grado di saturazione è in genere molto elevato e specie nei settori a nord del canale allacciante tali depositi possono presentare una possibile minaccia nei confronti dei fenomeni di liquefazione.

- **Litotipi ghiaioso-sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi (all-E3IIIc)**

Le unità sabbioso-ghiaiose sono classificabili come incoerenti e meccanicamente presentano una variabilità nei valori di resistenza compresi in un intervallo abbastanza ampio; ambiti di resistenza alla penetrazione piuttosto bassi nelle porzioni superficiali e resistenze più alte all'aumentare della profondità. I valori di N_{SPT} effettuati in corrispondenza di questi litotipi variano dai 34 ai 70 colpi (sondaggi S1-S2, DPSH 1–11). Il numero dei colpi è risultato spesso influenzato dal grado di addensamento dei depositi, dalla presenza o meno di falde idriche "sospese" e dalla percentuale di materiale a matrice più grossolana tipo ghiaia A questi materiali possono essere corrisposti i seguenti parametri geotecnici:

Ang. di attrito *(°)*	**Peso di Volume** *(t/m^3)*	**Peso di Volume Saturo** *(t/m^3)*
24-28	**1.7-2.2**	**1.9-2.2**

Questi depositi affiorano diffusamente nel settore di transizione tra i depositi lacustri e i depositi alluvionali ghiaiosi che si rinvengono più a sud. Sono compresi in una fascia altimetrica che ben si individua da un attenta analisi morfologica e spesso si presentano con intercalazioni di livelli limosi e sabbiosi specie al contatto con le unità lacustri.

L'assetto stratigrafico locale mostra variazioni verticali con interdigitazioni e corpi lenticolari a differente grado di permeabilità e pertanto la circolazione idrica sotterranea può esplicarsi secondo "falde sovrapposte".

Le intercalazioni argilloso-limose non sono sufficienti ad alterare il comportamento geotecnico per lo più granulare dei materiali investigati. Prove di laboratorio effettuate su campioni di argilla limosa prelevati a 8 metri dal p.c. hanno dato valori di Φ di 24° e un peso di volume allo stato naturale di 1,66 t/m^3.

- **Litotipi ghiaiosi (all-E2IIb,all-E2Ia)**

Questi materiali sono diffusamente affioranti nel territorio e si sono investigati attraverso prove penetrometriche DPSH che hanno rilevato alti valori di resistenza alla penetrazione denotano condizioni di addensamento per lo più elevate.

Si tratta di depositi in matrice variabile di materiale fine e abbastanza omogenei con buone caratteristiche meccaniche che in termini di Densità Relativa (Dr) sono classificati da moderatamente addensate ad addensate.

A questa unità geotecnica si possono attribuire i seguenti parametri geomeccanici:

Ang. di attrito (°)	**Peso di Volume** *(t/m³)*	**Peso di Volume Saturo** *(t/m³)*
26-32	**1.8-2.1**	**2.2-2.4**

Il comportamento geotecnico è granulare/incoerente con bassi valori di coesione e date le caratteristiche tessiturali per lo più grossolane è possibile assegnare a tale unità una permeabilità da medio alta ad elevata che si riflette in importanti fenomeni di infiltrazione.

Dal rilevamento di campagna e dai risultati di alcune prove penetrometriche come la DPSH 12 e 13 (ved. *Fig.15*), quest'ultima ubicata all'incrocio tra "*Via Pecorale*" e "*Via San Martino*" al limite meridionale dell'area di studio, i materiali investigati dopo un metro di terreno superficiale, hanno portato a rifiuto la prova e spesso presentano inclusi di dimensioni maggiori.

- **Litotipi calcarei, ammassi rocciosi (C-B1)**

Nel corso dello studio si sono effettuate diverse stazioni geomeccaniche concentrate in vicinanza delle strutture antropiche a ridosso di "*Via Montelle*" e "*Via Monte Grappa*" *(Fig.16)* ; gli affioramenti rocciosi, nel complesso presentano buone caratteristiche meccaniche, che ben sopportano le pendenze di degradazione. Si è rilevata la presenza di un reticolo di superfici con resistenza a trazione bassa o nulla denominate discontinuità (*Joint*), termine indicante le fessure, i piani di stratificazione, le zone di indebolimento e le faglie. La roccia è interessata dall'azione congiunta dei vari *sets* di discontinuità che determinano la scomposizione del calcare in singoli blocchi di forma e dimensione variabile.

Figura 16. Affioramenti calcarei lungo "Via Monte Grappa" dove si sono eseguite le stazioni geomeccaniche.

Il censimento delle discontinuità è stato eseguito utilizzando un criterio soggettivo dato lo stato di fratturazione che presentavano gli affioramenti presenti; si sono presi in considerazione i parametri di base per una classificazione dell'ammasso roccioso e dai dati acquisiti si è proceduto, adottando le metodologie di Beniawsky e Romana, alla determinazione del Rock Mass Rating (RMR,Beniawsky) e, con le dovute correzioni apportate da Romana nel 1985, dello Slope Mass Rating (SMR). L'analisi che ha permesso la caratterizzazione geomeccanica si è effettuata con software specifico Rock-Mechanics.

La resistenza a compressione uniassiale si è stimata osservando la risposta della roccia alla sua percussione con il martello da geologo mentre gli altri parametri di input (*Jv*, spaziatura, condizioni idrauliche, orientamento delle discontinuità apertura, persistenza, rugosità, alterazioni delle pareti) sono stati raccolti sul campo.

Il settore analizzato ha mostrato una generale uniformità e per le giaciture e per i sistemi di discontinuità con misure Jv variabili da 20 a 26 e pertanto l'unità calcarea si è caratterizzata in maniera univoca e ad essa si possono attribuire i seguenti parametri geomeccanici:

RMRbase	RMRcorretto	Classe	Descrizione
70.22	70.22	Seconda	Buono

Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strenght Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Coesione residua (kPa)	Angolo di attrito residuo (°)
40.44	65.22	351.1	40.11	280.88	33.09

- **Riporti, colluvi, falde di detrito(ant-G, col-E6IIIc,col-E6IIIa, fal-ZZ)**

In questa categoria si sono fatte rientrare diverse unità litotecniche che per alcuni aspetti possono essere considerate "simili" anche se possono presentare comportamenti geotecnici sostanzialmente differenti; in linea di massima in questa unità geotecnica rientrano depositi per lo più sciolti e superficiali con uno spessore massimo di 10 metri (fal-ZZ) e dal punto di vista geotecnico assumono un comportamento granulare con proprietà meccaniche per lo più scadenti specie nel primi metri dal p.c.. I terreni di riporo sono costituiti essenzialmente da materiali eterogenei, di sottofondo e di risulta in matrice limosa e sabbiosi con detrito calcareo e calcinacci e costituiscono piccoli terrapieni specie nel settore storico del centro cittadino.

Le coltri colluviali e di alterazione cartografate sono costituite da sabbie limose da sciolte a poco addensate con immersi frammenti calcarei (col-E6IIIa) o con comportamento geotecnico più coesivo (col-E6IIIc). Data l'estrema variabilità tessiturale e la mancanza di dati diretti tramite indagini in sito, per queste unità superficiali non si sono assegnati valori indice.

Le informazioni derivanti dalle indagini geotecniche in sito sono state integrate con i dati ottenuti da prove geofisiche che sono consistite nel dettaglio in n° 8 stendimenti di sismica superficiale tipo MASW e da n°13 punti di misura HVSR dei quali 10 effettuati *ex-novo* e ubicati in maniera tale da coprire l'intera area e cercando di posizionarle in corrispondenza delle microzone individuate cosi come illustrato nelle linee guida regionali.

Le prospezioni sismiche tipo MASW (*Multichannel Analisys of Surface Waves*) si sono prese in riferimento per la definizione delle caratteristiche sismo-elastiche dei terreni fino a profondità di circa 30-40 m, consentendo pertanto anche la definizione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio. Le acquisizioni sono state eseguite con stendimenti lineari di geofoni posti a distanza reciproca costante, tenendo in debito conto le condizioni geologiche locali e logistiche onde evitare variazioni stratigrafiche laterali nell'ambito della lunghezza dello stendimento e brusche variazioni di quota. Come sorgente energizzante è stato utilizzata una mazza del peso di 8 Kg, battente su una piastra di alluminio, in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia con forme d'onda ripetibili e direzionali con punto di impatto sul terreno esterno agli stendimenti, in allineamento con i rispettivi assi. L'acquisizione di campagna è stata condotta mediante il sismografo ECHO24/2010 SEISMIC UNIT a 24 bit, con 24 geofoni verticali con frequenza propria di 4,5 Hz. Il *processing* dei dati acquisiti è stato eseguito con software MASW di Vitantonio Roma.

Il risultato di sintesi delle linee sismiche MASW, ha permesso di ottenere il parametro fisico Vs,30 e quindi di inquadrare la categoria di sottosuolo oltre che a definire sismostratigraficamente le aree investigate attraverso i profili Vs ottenuti dalla fase di *processing* (*Fig.17*).

Le linee sismiche hanno mostrato profili di velocità con una Vs che varia con la profondità e nel complesso mostrano un aumento delle velocità delle onde Vs finali con la profondità denotando un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche. Si è osservato come i valori del parametro Vs30 risultano crescenti passando dal settore settentrionale al meridionale in accordo con i dati; a tal proposito si riportano i profili di Vs registrati ed esemplificativi. All'incrocio tra *Via Roma* e *Via Fossa di Villa*, nel settore distale della conoide, i terreni sono caratterizzati da una velocità delle onde Vs30 di 350 m/s**.** La copertura dei depositi lacustri è caratterizzata da una velocità delle onde compresa tra 180 e 360 m/s nei settori posti in prossimità del "*Canale Allacciante Meridionale*" e in alcune indagini si sono riscontrate anche inversioni di velocità come nei pressi de "Il Molino" sulla Strada 37 ove la categoria di sottosuolo è risultata essere S2 (MASW7 in fig.17). All'interno dei depositi lacustri in prossimità con il confine comunale settentrionale, alcuni stendimenti sismici effettuati (non riportati in questo studio) hanno consentito di caratterizzare una tipologia di sottosuolo di tipo D con una Vs,30 < di 180 m/s.

Valori più elevati si riscontrano in corrispondenza delle coltri ghiaiose e ghiaioso sabbiose; più nel dettaglio i profili Vs mostrano dopo un primo intervallo sismostratigrafico di circa 2 metri di spessore una velocità delle onde Vs di circa 460 m/s. Dal profilo delle Vs desunto dalla MASW 4 si sono riscontrate a circa 20 metri dal p.c. velocità prossime ai 650 m/s che denotano un alto grado di addensamento dei depositi.

La MASW6 ubicata nel centro urbano ha individuato dopo un primo intervallo sismostratigrafico di circa 5-6 metri di spessore con velocità comprese tra 200 e 300 m/s, un sismostrato a spessore indefinito con velocità di circa 750 m/s riconducibile alla parte alterata del "*bedrock*" calcareo.

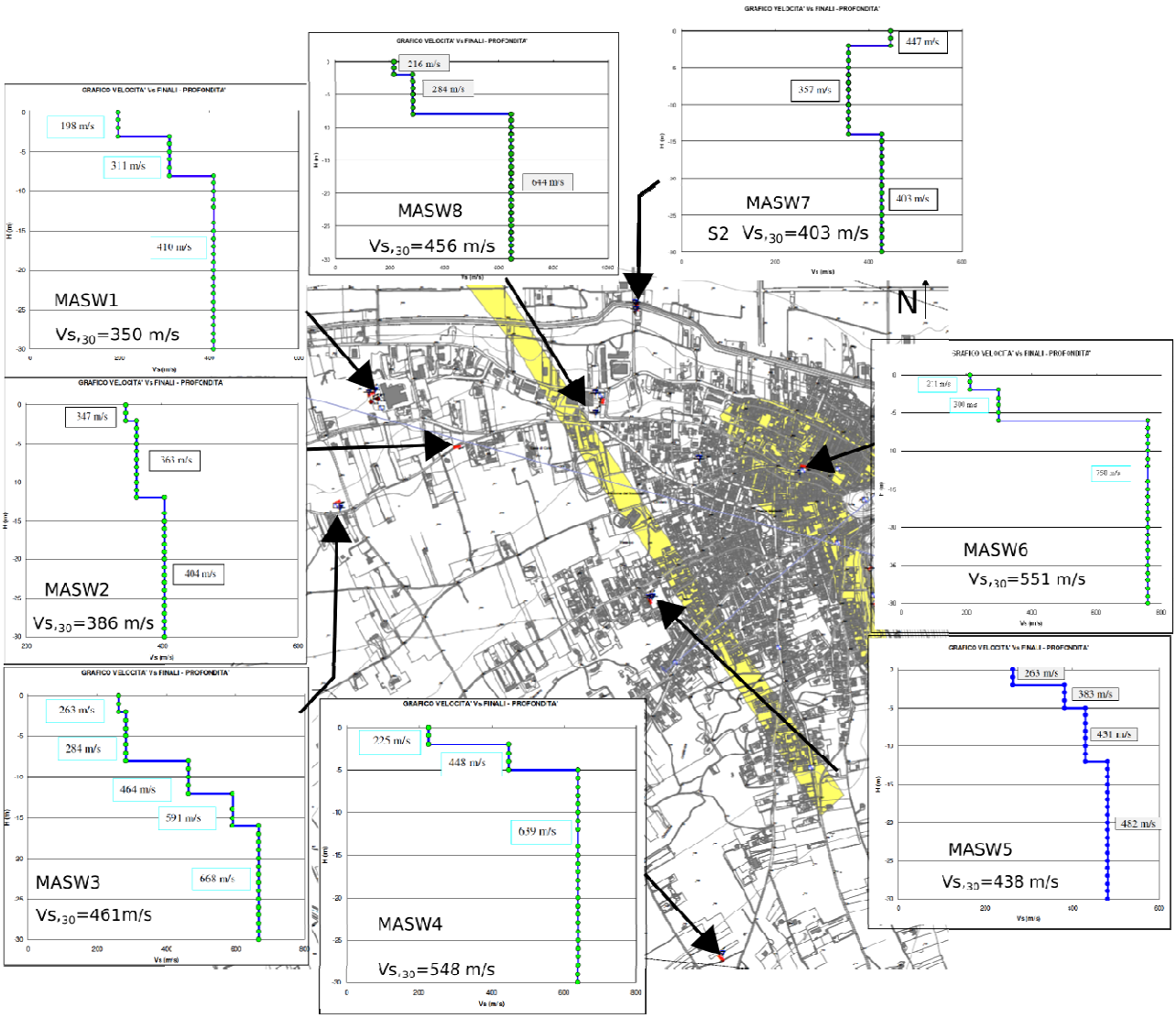


Figura 17 Stendimenti di sismica superficiale tipo MASW con relativa ubicazione; profili Vs con la profondità e Vs,30.

Per il calcolo dei rapporti spettrali H/V da "*noise*" sismico si sono utilizzati i dati desunti sia da tromografo digitale portatile progettato specificatamente per l'acquisizione del rumore sismico, sia da un geofono tricomponente con freuqenza propria di 2Hz collegato a sismografo ECHO24/2010. Lo strumento (Tromino, Micromed SpA, 10 x 7 x 14 cm per 1 kg di peso) è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, alimentato da 2 batterie AA da 1.5 V, senza cavi esterni. I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alle frequenze di campionamento di 128 Hz poichè adoperato a fini litostratigrafici.

I dati registrati con tale strumento si sono elaborati con il software Grilla mentre attraverso il software H/V di Vitantonio Roma si è proceduto nelle analisi delle misure registrate attraverso il geofono sopra descritto.

Figura 18. Particolare fase di acquisizione misure HVSR: sulla sinistra indagine HVSR n°3 registrata con tromino in prossimità di "Via Circonfucense", sulla destra indagine HVSR n°9effettuata con geofono tricomponente sui litotipi calcarei a monte di "Via Monte Grappa"..

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) è basata sulla misura dei rapporti medi fra le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali e verticale del rumore sismico ambientale. Le frequenze di risonanza corrispondono ai massimi della funzione che rappresenta i rapporti spettrali medi in funzione della frequenza (funzione H/V). L'ampiezza di questi massimi è proporzionale (anche se non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica esistente alla base della copertura. Dalle misure ritenute di buona qualità ed elaborate secondo i criteri generali riportati negli ICMS(2008) che soddisfano i criteri SESAME (2005) si sono potuti individuare le frequenze di risonanza del sito e trarre importanti interpretazioni come ad esempio la stima del "*bedrock*".

I risultati indicano inequivocabilmente la presenza di depositi di copertura con un contrasto di impedenza netto rispetto al substrato e spessori di questi anche superiori a 100 metri come si evince dai picchi di risonanza a basse frequenze (circa 1Hz).

In corrispondenza dei litotipi calcarei, lo spettro registrato non mostra alcun picco significativo a testimonianza della non presenza di fenomeni di amplificazione.

I picchi di risonanza a frequenze più alte sono da mettere in correlazione a contatti stratigrafici più superficiali o a variazioni del grado di addensamento di stessi depositi all'interno delle coltri alluvionali. Alcune registrazioni ubicate nel centro storico del paese hanno mostrato ampiezze del picco elevate nel rapporto H/V pari a 7 a frequenze elevate (circa 15Hz) e ciò è imputabile alla presenza di contrasti di impedenza elevati dovuti a contatti stratigrafici significativi a profondità di qualche metro. Alcuni esempi delle registrazioni HVSR sono riportati in figura 19.

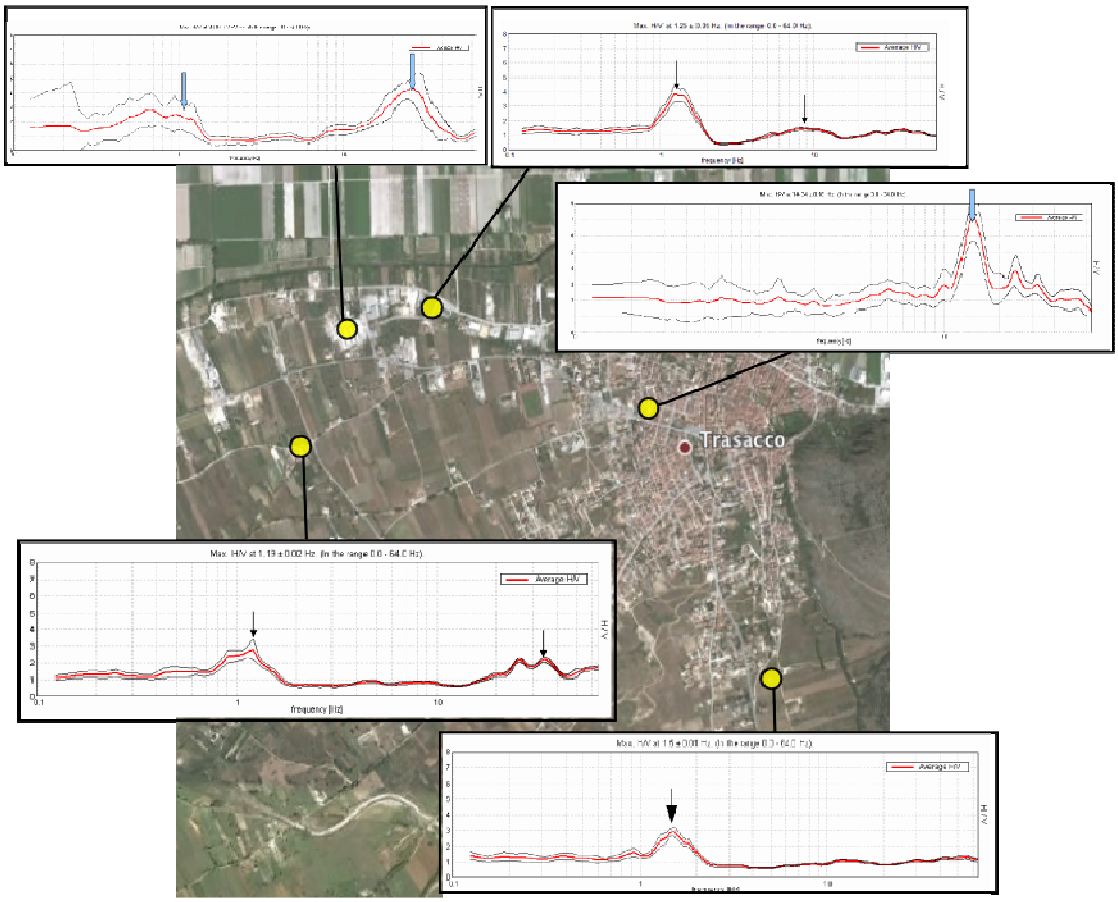


Figura 19 Esempi di spettri HVSR registratisul territorio

5. Modello del sottosuolo

In questo paragrafo si vuole elaborare un modello che permette di definire i rapporti reciproci tra le diverse unità identificate e stimare l'andamento del substrato sismico. Avere un'appropriata conoscenza del substrato geologico è di primaria importanza, ancor di più in quelle zone ad alta pericolosità sismica, dove gli effetti di impedenza locale devono essere noti al fine di attuare un'adeguata prevenzione sismica.

Alla ricostruzione di un modello del sottosuolo finalizzato all'analisi numerica e quindi alla stima dei fattori di amplificazione si è pervenuti attraverso un esame comparato dei dati disponibili in letteratura e quelli desunti dalle indagini effettuate.

Le linee sismiche profonde consultate nell'articolo di Sedimentary Geology di Cavinato et al. e le relative isocrone sono risultate utili nel definire le principali geometrie e i rapporti tra il substrato affiorante e i depositi lacustri. Dall'esame della linea 2, che nel settore meridionale attraversa l'attuale centro cittadino, si può estrapolare un modello strutturale abbastanza definito in termini strutturali; dall'interpretazione della linea si comprende come il nucleo storico del paese si colloca su una struttura ad "horst", rialzata a causa di faglie in regime tettonico distensivo (*Fig.20*).

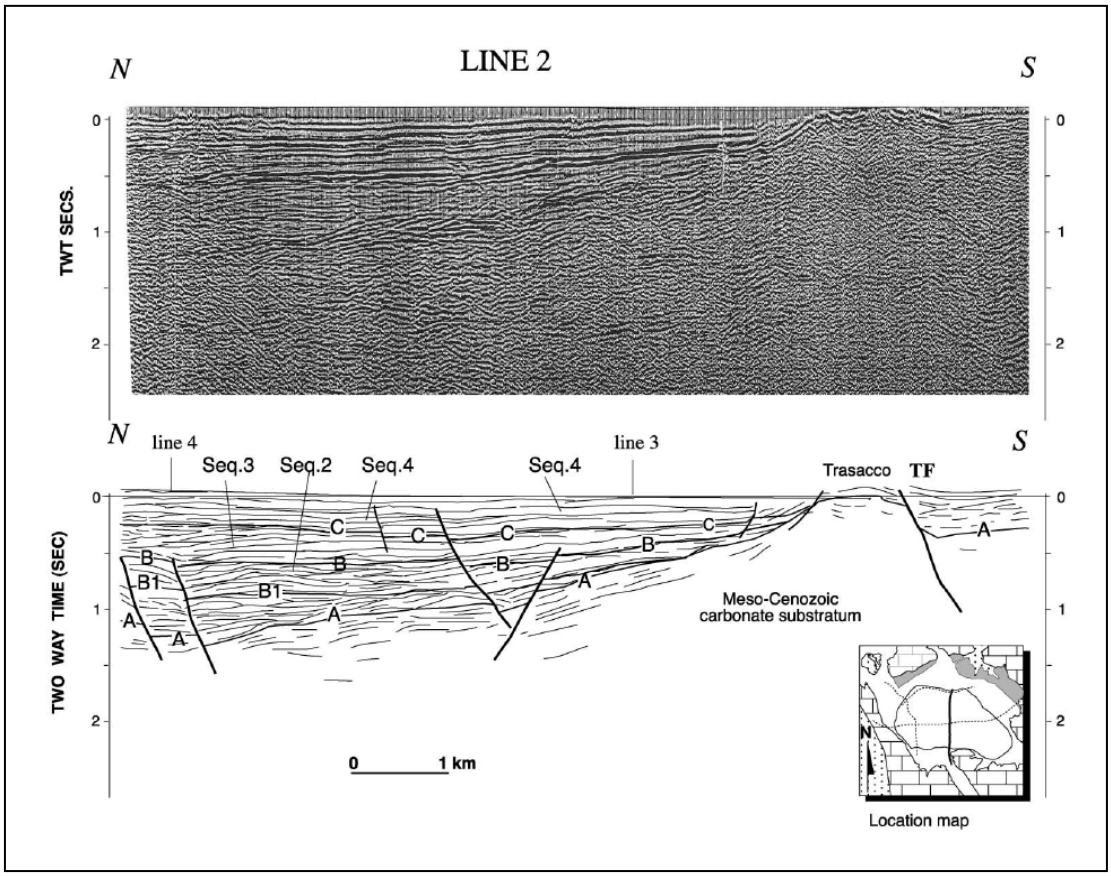


Figura 20 Profilo sismico a riflessione che attraversa il settore di Trasacco (da Cavinato et al. 2002)

Il substrato sismico costituito dalle unità geologiche lapidee è visibile in affioramento sulle dorsali retrostanti il centro abitato e da questo settore tende ad approfondirsi sia verso nord che verso ovest.

La presenza delle importanti strutture tettoniche influisce in maniera diretta sulla "velocità" di approfondimento del "*bedrock*" e pertanto risulta essenziale stimare il rigetto delle faglie per definire con buon margine di errore l'entità del ribassamento.

In direzione E-W il substrato si approfondisce attraverso la faglia della Vallelonga per poi risalire in corrispondenza delle dorsali carbonatiche retrostanti il comune di Luco dei Marsi; in questa direzione il basamento viene fratturato e dislocato da un sistema di faglie dirette che mettono in contatto i litotipi calcarei con la depressione della Vallelonga riempita da circa 150-200 metri di depositi continentali di origine alluvionale e fluvioglaciale prevalentemente ghiaiosi; l'assetto strutturale della valle può essere assimilato ad un semi-graben.

In direzione N-S, dagli studi consultati e dalle indagini HVSR si può ritenere come si ha una più repentina variazione degli spessori coinvolti e pertanto maggiore l'entità della dislocazione che si traduce in un abbassamento del substrato sismico. A tal proposito l'indagine HVSR 3 risultata di buona qualità poichè soddisfa tutti i criteri SESAME ha permesso una stima della profondità del substrato sismico che passa in una distanza di 80 metri da affiorante, lungo "*Via della Concezione*" al bordo della "*Fossa Lapidaria*" (*Fig.22*), a circa 100 metri di profondità dal piano campagna in prossimità di "*Via Circonfucense*".

Per quanto riguarda l'area di interesse il modello mostra uno spessore massimo dei sedimenti quaternari dell'ordine dei 200-300 m che mascherano il substrato di età meso-cenozoica. Gli spessori vanno assottigliandosi nel settore occidentale del territorio in corrispondenza dei depositi alluvionali.

Tra i diversi metodi geofisici la gravimetria consente, attraverso misure effettuate sulla superficie terrestre, di osservare e interpretare anomalie di gravità prodotte da contrasti laterali non noti di densità tra masse sepolte, e quindi di definire le profondità e gli spessori delle rocce presenti nel sottosuolo.

Si è fatto riferimento anche alle anomalie di gravità dal sito GeoMapViewer dell'ISPRA; nonostante le isoanomale non hanno un intervallo di dettaglio, è stato possibile fare delle considerazioni di massima circa la modalità di approfondimento del substrato.

Dalle isoanomale si può osservare un andamento diverso del settore orientale più rapido approfondimento nella zona di minimo presente nella zona centrale della piana del settore orientale e un andamento

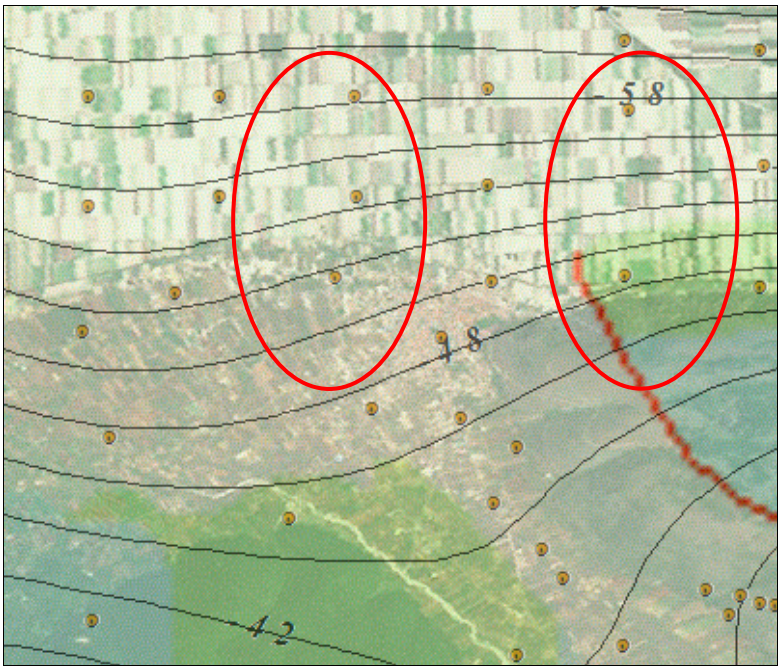


Figura 21 Isoanomale con intervallo 2 mgal - d=2,67 g/cmc (da http://sgi1.isprambiente.it/GeoMapViewer/index.html)

Figura 22. Dettaglio degli affioramenti calcarei al di sotto delle abitazioni lungo "Via delle Concezione". La foto è stata scattata dall'interno della "fossa Lapidaria" dove il substrato sismico è coperto da uno spessore massimo di 10 metri di depositi quaternari.

Il modello che ne deriva mette in luce come il si sia formato a seguito dell'attività quaternaria e olocenica delle faglie dirette, che man mano che ribassavano le varie porzioni della Piana, in particolare il settore orientale e sud-orientale, creavano le condizioni affinché una grande quantità di sedimenti di origine continentale andasse a riempire le porzioni più depresse della conca (fino a circa 1000 m di spessore nel settore centrale).

Solamente una maggiore densità di sondaggi profondi o profili sismici a riflessione potrebbero nel futuro migliorare il modello geologico del sottosuolo e chiarire in maniera migliore le geometrie del substrato sismico.

6. Interpretazioni ed incertezze

Lo studio condotto, che ha portato alla produzione degli elaborati previsti per il livello I, ha messo in luce alcuni aspetti che meritano delle oculate riflessioni in vista delle fasi successive di analisi prima fra tutte lo stato di attività delle faglie cartografate e la loro esatta geometria al fine di identificare in maniera migliore le aree interessate da deformazione cosismica della superficie topografica per tracciare una zona con incertezza minore (Boncio et al.,2012).

Per la valutazione del rischio sismico, dati paleosismologici pubblicati da Galadini e Galli (1999) evidenziano un'attività persistente della faglia di Trasacco nel corso dell'Olocene; ad essa è riferibile una fagliazione di superficie legata al terremoto del 1915 (Ms=7.0 in Camassi e Stucchi, 1997). In base ai dati paleosismologici, la faglia è responsabile della dislocazione della successione lacustre recente del bacino del Fucino (*Fig.23*), depositata tra la parte finale del Pleistocene superiore e il XIX secolo (prima del prosciugamento del lago) e di un canale di drenaggio di età romana.

Per questo lineamento tettonico, che interessa la zona nord orientale dell'area di studio, la traccia si è cartografata con certezza e ritenuta attiva date le ricche documentazioni a riguardo.

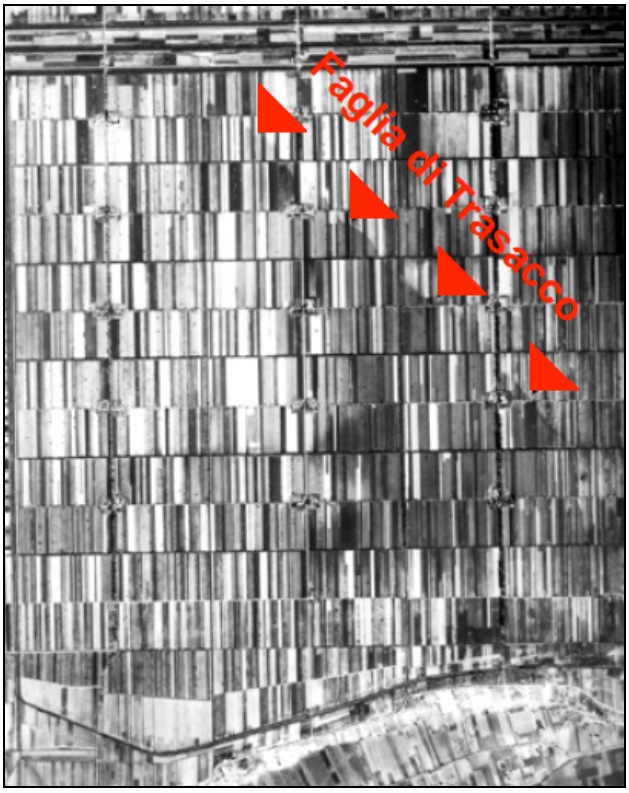


Figura 23. Fotografia aerea area Trasacco canali collettori (volo IGM,1954). I triangoli indicano la linea (espressione superficiale della faglia di Trasacco) che separa i settori con diversa tonalità di grigio effetto delle diverse caratteristiche dei suoli e dei depositi lacustri su cui si sono sviluppati (da Galadini e Galli, 1999).

La persistenza dell'attività lungo la faglia di Trasacco è legata al ruolo di faglia secondaria che essa ricopre nell'architettura del bacino del Fucino (Galadini e Messina, 1994). Per questa faglia è stato stimato un rateo di movimento verticale pari a 0.27-0.29 mm/a, simile a quello delle strutture principali che hanno guidato l'evoluzione del bacino e che lo bordano verso est. Questo dato testimonia che la faglia di Trasacco contribuisce significativamente alla deformazione estensionale complessiva del bacino del Fucino. In questa area, a testimonianza di un'attività tettonica recente, è stata individuata e misurata una cospicua concentrazione di gas del suolo risalenti attraverso le faglie che interessano la copertura quaternaria (Ciotoli et al.,2007).

Le incertezze per il tracciamento degli altri segmenti ritenuti attivi (cartografati in rosso nella Carta Geologico-Tecnica) sono scaturite dalla mancanza di evidenze in superficie e pertanto per il tracciamento delle suddette si è fatto riferimento agli articoli scientifici e al catalogo ITHACA (*Fig.24*).

Figura 24. Fotoaerea dell'area di Trasacco con le faglie attive secondo il catalogo Italian Hazard from Capable Faults (da http://sgi1.isprambiente.it/GeoMapViewer/index.html).

Da interpretazione dei dati a disposizione e a seguito di diversi incontri nelle varie fasi dell'attività con il Tavolo Tecnico di Monitoraggio, si sono riportati dei lineamenti che probabilmente risultano attivi (in fuxia nella Carta Geologico-Tecnica) in corrispondenza dei quali si sono definite delle aree dove si ritiene che vengano concentrate ulteriori indagini per i livelli successivi (II e III Livello) come ad esempio stendimenti sismici e trincee paleosismologiche.

Per quanto concerne l'assetto litologico-strutturale, le incertezze maggiori riguardano il settore del centro dell'abitato (*Fig.25*); alcune misure HVSR hanno permesso di "vincolare" il limite delle diverse unità litotecniche cosi come sono state cartografate; tuttavia per una più certa definizione, in questo settore è auspicabile effettuare ulteriori studi cosi come riportato nella Carta delle Indagini ad esempio con sondaggi geognostici profondi. Il commento alle misure di microtremore è riportato nel paragrafo successivo.

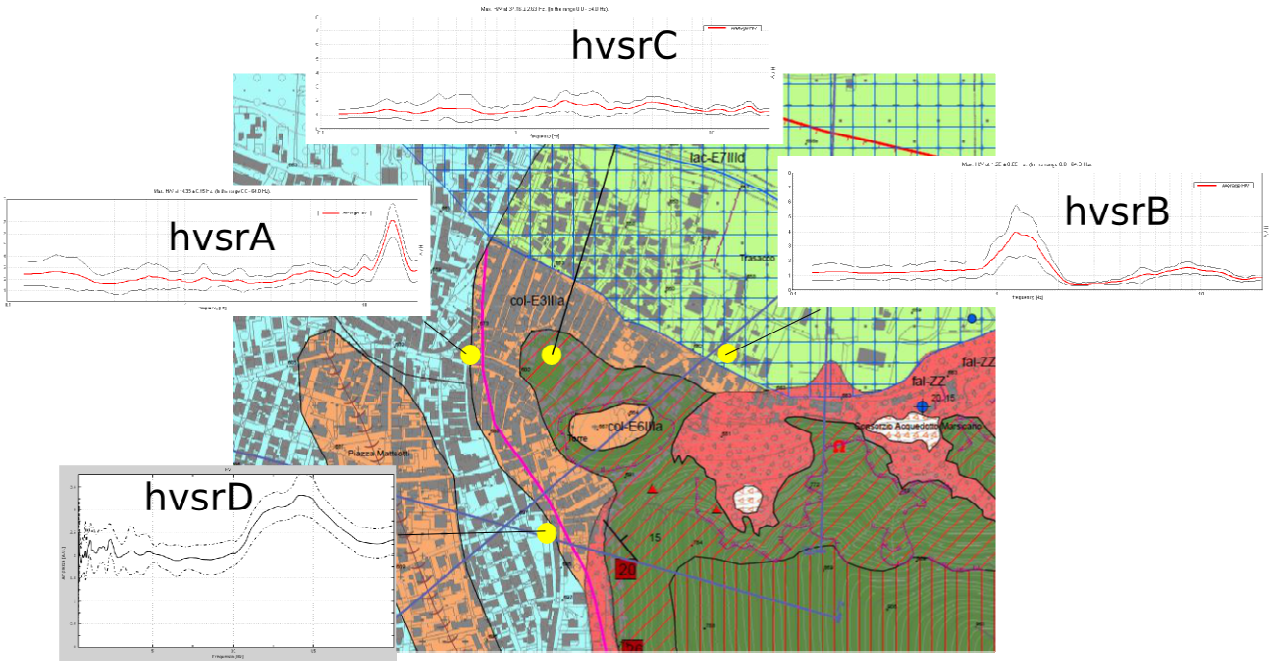


Figura 25. Stralcio della Carta Geologico-Tecnica mostrante il centro urbano del comune.

7. Metodologie di elaborazione e risultati

L'elaborazione dei dati disponibili si sono effettuate con specifici software che hanno permesso la restituzione dei parametri utilizzati per definire le caratteristiche geotecniche e geofisiche delle unità presenti.

Per quanto concerne i dati geotecnici desunti dalle prove penetrometriche DPSH e SPT questi si sono elaborati mediante un programma di calcolo automatico Dynamic Probing della *GeoStru Software*.

Il programma calcola il rapporto delle energie trasmesse (coefficiente di correlazione con SPT) tramite le elaborazioni proposte da Pasqualini 1983 - Meyerhof 1956 - Desai 1968 - Borowczyk-Frankowsky 1981.

Permette inoltre di utilizzare i dati ottenuti dall'effettuazione di prove penetrometriche per estrapolare utili informazioni geotecniche e geologiche. In particolare consente di ottenere informazioni su:

- l'andamento verticale e orizzontale degli intervalli stratigrafici,
- la caratterizzazione litologica delle unità stratigrafiche,
- i parametri geotecnici suggeriti da vari autori in funzione dei valori del numero dei colpi e delle resistenza alla punta.

Come già scritto nel paragrafo 4, per definire le caratteristiche delle unità litoidi si è adoperato il software Rock Mechanics che ha permesso la classificazione della roccia da cui si è ricavato l'indice Rock Mass Rating (RMR). Il sofware si basa su sei parametri di input che sono:

A1 = resistenza a compressione uniassiale;
A2 = Rock Quality Designation Index (Indice RQD);
A3 = spaziatura delle discontinuità;
A4 = condizioni delle discontinuità;
A5 = condizioni idrauliche;
A6 = orientamento delle discontinuità.

Gli stendimenti di sismica superficiale tipo MASW si sono processaati con il sofware MASW che utilizza le registrazioni delle onde superficiali (Rayleigh) per analizzare, attraverso un metodo di inversione, i risultati in termini di velocità delle onde S in un semispazio stratificato. La ricerca del profilo di velocità delle onde di taglio Vs con il metodo MASW consiste nel modificare il profilo di velocità Vs finchè non sia raggiunto un buon accordo tra la curva di dispersione apparente misurata in sito e la curva di dispersione apparente simulata numericamente.

I dati di campagna acquisiti in formato .SGY si sono elaborati seguendo i suggerimenti riportati nel manuale di V.Roma (2006) impostando nell'inversione del dato un numero di modi maggiore di 1, con 20 iterazioni e un errore tra curva sperimentale e teorica del 10%.

In genere un errore < del 10% indica il raggiungimento di un buon risultato con un profilo di Vs valido da un punto di vista progettuale.

Le registrazioni HVSR si sono elaborate con i software già menzionati nel paragrafo 4.

In questo paragrafo si riportano le procedure utilizzate seguendo i criteri descritti in Castellaro el al. (2005), con parametri:

1. larghezza delle finestre di analisi 20 s,
2. lisciamento secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale,
3. rimozione dei transienti sulla serie temporale degli H/V.

Le ragioni della scelta del lisciamento triangolare al posto del lisciamento Konno e Omachi (1998) proposto dalle linee guida SESAME (2005) risiedono nel fatto che quest'ultimo non dà alcuna differenza statisticamente rilevante rispetto al lisciamento triangolare, pertanto si è deciso di adottare il lisciamento più semplice. Su tutte le misure registrate è stato necessario effettuare una rimozione dei transienti sulla serie temporale degli H/V.

La qualità delle misure è risultata buona poichè si sono eseguite le verifiche di attendibilità del risultato in termini di affidabilità della curva e di chiarezza del picco massimo in frequenza della curva, determinante la frequenza di risonanza del sito. Le condizioni di affidabilità della curva sono le prime tre della tabella in figura mentre le ultime sei sono le condizioni di chiarezza (*Fig.26*).

Alcune di queste sono risultate indispensabili per la definizione dell'assetto stratigrafico e per stimare lo spessore delle coltri delle coperture quaternarie; in alcuni casi (HVSR 4,7) le misure hanno evidenziato la presenza di un secondo picco di risonanza riconducibile a passaggi litostratigrafici superficiali tra corpi a diversa impedenza.

Nel settore del centro storico le misure si sono rilevate indispensabile nel cartografare le unità presenti. Più nel dettaglio la misura HVSR 1 non avendo registrato nessun picco ha avvalorato l'ipotesi di un affioramento del substrato sismico, la misura 5 e 8 date le ampiezze e le frequenze del picco fondamentale indicano chiaramente un contatto molto superficiale tra depositi sciolti e litotipi con buone caratteristiche meccaniche riconducibili al substrato. La misura HVSR 3 è stata più volte menzionata circa la validità per la ricostruzione del modello del sottosuolo e in figura 26 se ne riporta l'esito secondo le linee guida SESAME (2005).

Max. H/V at 1.25 ± 0.05 Hz. (in the range 0.0 - 64.0 Hz)

Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	1.25 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	975.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5$Hz $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5$Hz	Exceeded 0 out of 61 times	OK	
Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ | $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.906 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ | $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.813 Hz	OK	
$A_0 > 2$	3.85 > 2	OK	
$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	|0.01839| < 0.05	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.02299 < 0.125	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.2566 < 1.78	OK	

L_w	Lunghezza della finestra
n_w	Numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	Numero di cicli significativi
f	Frequenza attuale
f_0	Picco di frequenza H/V
σ_f	Deviazione standard del picco di frequenza H/V
$\varepsilon(f_0)$	Valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	Ampiezza del picco H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	Ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	Frequenza tra $f_0/4$ e f_0 per la quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	Frequenza tra f_0 e $4f_0$ per la quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	Deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva media $A_{H/V}(f)$ dovrebbe essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{logH/V}(f)$	Deviazione standard della curva log $A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	Valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Freq.range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 f_0	0.2 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ per $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Figura 26 Esito dell'analisi del picco principale del sito secondo le linee guida SESAME (2005); nello specifico i risultati dell'analisi si riferisce alla registrazione n°3 ubicata in "Via Circonfucense".

Come riportato nel paragrafo 1.6.4 degli ICMS (2008), in questo paragrafo si vuole riportare anche la metodologia che ha permesso di delimitare le aree ove si ritiene possibile l'instaurarsi di fenomeni di liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.

Nell'area ove affiorano orizzonti superficiali sabbiosi e sabbioso-limosi, non essendo risultate soddisfatte le circostanze previste al punto 7.11.3.4.2. del D.M. del 14/01/2008 si è proceduto ad una verifica a liquefazione per le profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili. In considerazione della presenza di una falda a breve profondità dal piano campagna e di litotipi superficiali di tipo granulare si sono eseguite delle verifiche dalle quali è emerso come tali settori risultano avere un potenziale di suscettibilità alla liquefazione medio elevato.

La metodologia adottata per la verifica si è basata su relazioni storico-empiriche in cui il coefficiente di sicurezza viene definito dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione e la sollecitazione indotta dal terremoto di riferimento come indicato nel D.M. 14.01.2008. I parametri che hanno permesso una valutazione della resistenza a liquefazione sono stati estrapolati dalle indagini effettuate. Tra i vari metodi proposti in letteratura si è scelto di adottare il Metodo di Seed ed Idris (1971) che valuta il potenziale di liquefazione a partire da prove penetrometriche dinamiche e il metodo di Andrus e Strokoe (1997) modificato che valuta tale potenziale dal valore della velocità delle onde di taglio S del terreno in oggetto e dell'input sismico.

8. Elaborati cartografici

8.1 Carta delle indagini

Nella carta si sono riportate le indagini utilizzate e prese come riferimento per il presente studio.

Le ubicazioni non presentano margini di errore significativi; in alcuni siti dove sono disponibili diverse tipologie di indagini, si è cercato di "posizionare" i punti di misura nella maniera più adeguata possibile per la leggibilità della carta.

Si sono riportate le tracce delle sezioni geologiche che si sono realizzate risultate utili a prime considerazioni sulla pericolosità sismica locale.

Inoltre, cosi come suggerito dalle linee guida regionali, si sono cartografate le aree in cui maggiori sono risultate le incertezze e pertanto si ritiene che vengano effettuate ulteriori indagini.

8.2 Carta geologico-tecnica

Si tratta di un elaborato di fondamentale importanza per la definizione dei caratteri litotecnici delle unità geologiche affioranti e rappresenta lo strumento di base per la redazione della carta Microzone Omogenee in prospettiva Sismica

La carta del comportamento fisico - meccanico dei terreni viene realizzata attraverso l'incrocio dei dati geomeccanici e delle unità litostratigrafiche; la procedura utilizzata è rappresentata da una matrice di base alla quale si associano alcuni elementi di microzonazione sismica. Per la sua definizione, sono state valutate: le caratteristiche geotecniche dei diversi complessi e formazioni litologiche;i parametri geomeccanici che fanno riferimento a dati relativi a composizione litologica, al contenuto d'acqua, allo stato di consistenza e compattezza dei terreni come cementazione, grado di fratturazione ed alterazione.

La descrizione delle unità litotecniche individuate e le caratteristiche geotecniche delle stesse si sono riportate nel paragrafo 4.

Si vuole segnalare la presenza, specie nel centro urbano di terreni di riporto, di sottofondo e di risulta storici ed attuali che presentano spessori < di 3 metri e pertanto non si sono cartografati.

In corrispondenza dei depositi alluvionali nelle zone non antropizzate, il primo sottosuolo è costituito da terreno vegetale con uno spessore massimo di circa 2 metri a cui seguono le unità litotecniche cartografate.

8.3 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica e delle frequenze di risonanza

L'elaborato è un prodotto di estrema importanza ai fini delle scelte di pianificazione territoriale rappresentando uno strumento che consente di dare informazioni sintetiche ottenute dalla sovrapposizione di informazioni di dati geologici, geomorfologici, idrogeologici, geotecnici e geofisici attraverso la suddivisione del territorio in zone che presentano un medesimo potenziale di suscettibilità a fenomeni di amplificazione locale indotto dal sisma. La carta cosi redatta evidenzia ambiti omogenei dove si può prevedere l'occorrenza di diversi tipi di effetti prodotti dall'azione sismica come amplificazioni, instabilità e liquefazione.

Nel contesto del territorio comunale sono state identificate diverse situazioni che, per le specifiche condizioni possono dare luogo a significativi incrementi della fase sismica e dare origine a fenomeni di instabilità locale.

Non sono emerse Aree stabili rappresentate dalle zone in cui la pendenza è inferiore a 15° ed il substrato roccioso è affiorante

Per la realizzazione delle carte si è tenuto conto delle caratteristiche geologico-geomorfologiche di superficie, della geologia di sottosuolo ricostruita dalle sezioni geologiche e dai dati sia geofisici che di sondaggio, e dei risultati emersi dal rilevamento di campagna.

Sono state distinte:

1) zone stabili suscettibili di amplificazione locale per effetti stratigrafici (prevalentemente) e/o per effetti topografici;

2) zone suscettibili di instabilità.

Le zone stabili caratterizzate da affioramenti di substrato lapideo con pendenza superiore a 15° sono state inserite fra le zone suscettibili di amplificazione per effetti topografici.

Le aree con depositi di copertura continentali non cementati sono state considerate suscettibili di amplificazioni locali per effetti stratigrafici, con pericolosità variabile in funzione della locale stratigrafia ricostruita mediante dei *logs* rappresentativi.

Nelle zone suscettibili di instabilità sono state inserite quelle aree interessate da "faglie attive e capaci", le aree con terreni potenzialmente liquefacibili e i settori dei versanti calcarei dove si riconoscono forme di instabilità per crollo e/o ribaltamento in stato quiescente.

I settori interessati da "*instabilità di versante*" si sono esaminate con particolare riferimento alle carte della pericolosità e del rischio di frana e processi erosivi fornite dall'Autorità di Bacino dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno e dal confronto dei dati disponibili dal progetto IFFI.

In riferimento alle zone suscettibili di instabilità per "faglie attive e capaci", queste si riferiscono al sistema di faglie attive, ovvero capaci di rompere in superficie che caratterizzano il paesaggio urbano.

In funzione dei dati disponibili, si è distinta una "Zona di Attenzione" che necessita di ulteriori indagini specialistiche per definire con certezza geometria, attività e relativa fascia di rispetto.

Si è identificata inoltre un area di sovrapposizione di due zone suscettibili di instabilità.

Nell'ambito delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali le diverse classificazioni riportate nella carta, non sono ordinate secondo criteri di pericolosità crescente in quanto ciascuna possiede una particolare identità sia in relazione alle caratteristiche geologiche e geomorfologiche che a quelle sismiche.

Sulla base delle caratteristiche geologico-tecniche, stratigrafiche e geofisiche dei terreni dedotte si sono diversificate 12 zone principali.

Nella Zona **K1** e **K2** lo sviluppo urbanistico risulta essere pressoché assente; questa classe corrisponde ai rilievi calcarei retrostanti il centro abitato che materializzano la dorsale Monte Alto-Monte Labbrone e quelli di Colle San Martino-Colle Castagno. In questa zona gli effetti amplificativi del moto sismico sono dovuti alle caratteristiche topografiche; i versanti presentano pendenze maggiori di 15° e ricadono nella categoria T2 mentre nelle zone di cresta si può attribuire la categoria T3.

La zona **K3** comprende la fascia di raccordo tra le litologie calcaree e i depositi alluvionali ed è caratterizzata da detriti calcarei eterodimensionali con spessore variabile in genere maggiore allontanandosi dal piede del versante.

La zona **K4** comprende i depositi lacustri limosi e sabbioso-limosi con presenza di livelli di materia organica; lo spessore supposto, anche dalle misure di microtremore ambientale, è maggiore di 100 metri e il profilo delle onde Vs in genere rientra in una categoria "C". Dall'analisi delle risultanze, l'edificabilità è sconsigliata e per le caratteristiche intrinseche dei materiali e per possibili fenomeni di liquefazione.

Ad esclusione della zona **K10** che si è distinta per la presenza di una coltre di terreno di riporto nel primo sottosuolo, **K8**,**K9 e K12** che vogliono segnalare la presenza di coltri eluvio-colluviali, le altre zone classificate e distinte comprendono i depositi alluvionali e fluvio-glaciali con variazioni locali della tessitura, del grado di addensamento e nella presenza di intercalazioni all'interno.

Gran parte del territorio in oggetto è costituito principalmente da alluvioni ghiaioso-sabbiose (**K5**) con percentuali variabili di materiale più fine e possibili lenti di sabbie limose e argillose (**K7**). Tali sedimenti, depositati per mezzo di una conoide alluvionale e dal divagare sulla depressione del corso d'acqua "*Fosso di Rosa*", hanno natura generalmente calcarea, subordinatamente arenaceo marnosa, con inclusi anche di grosse dimensioni, che presentano a luoghi spigoli subarrotondati, raramente vivi (**K6**).

La coltre ghiaioso-sabbiosa caratterizzante l'area, nel complesso, non determina particolari condizioni sfavorevoli per l'edificabilità poiché presenta buone caratteristiche geomeccaniche e profili di velocità delle onde Vs crescenti con la profondità denotando un maggior addensamento dei depositi. Sono comunque da verificarsi puntualmente in fase progettuale ed esecutiva i caratteri geotecnici, al fine di escludere la presenza di livelli limoso–argillosi intercalati, aventi caratteristiche geotecniche scadenti.

Le misure HVSR riportate sulla carta sono state riclassificate e riorganizzate per una loro rappresentazione cartografica in termini di classi di frequenza e ampiezza suddividendo la frequenza fondamentale (F0) dal secondo picco (F1).

9. Confronto con la distribuzione dei danni con gli eventi passati

Anche se le fonti storiche sul terremoto marsicano del 1915 sono abbondati non si hanno note sulla vulnerabilità delle strutture coinvolte nell'abitato di Trasacco. Immediatamente dopo l'evento, i rilevamenti effettuati da Oddone (1915) fornirono delle descrizioni molto precise degli effetti geologici del terremoto soltanto per alcune aree della conca fucense. In seguito da alcuni studi paleosismologici (Galadini et al. 1999) hanno consentito di acquisire nuovi dati sugli effetti cosismici del 1915.

Nella zona di Trasacco, tra strada 37 e fosso 41 l'analisi della trincea effettuata per scopi paleosismologici ha consentito l'individuazione di effetti di fenomeni di liquefazione verificatisi a seguito dell'evento del 15. Questi effetti sono evidenziati dalla presenza di più fratture nella successione sedimentaria lacustre riempite di sedimenti completamente destrutturati (*Fig.27*).

Nel corso del terremoto del 1915 si sarebbero verificati dei crolli di blocchi e speleotemi nella grotta di Ortucchio (Radmilli,1981). Le rotture degli speleotemi presenti nella grotta riparo "Continenza" invece, secondo l'autore, sono avvenute quando la grotta non era occupata da insediamenti preistorici.

Gli spostamenti degli assi delle colonne fratturate potrebbero essere dovuti ad assestamento dei blocchi che costituiscono il deposito detritico su cui gli speleotemi appoggiano rappresentando gli effetti di ripetuti scuotimenti.

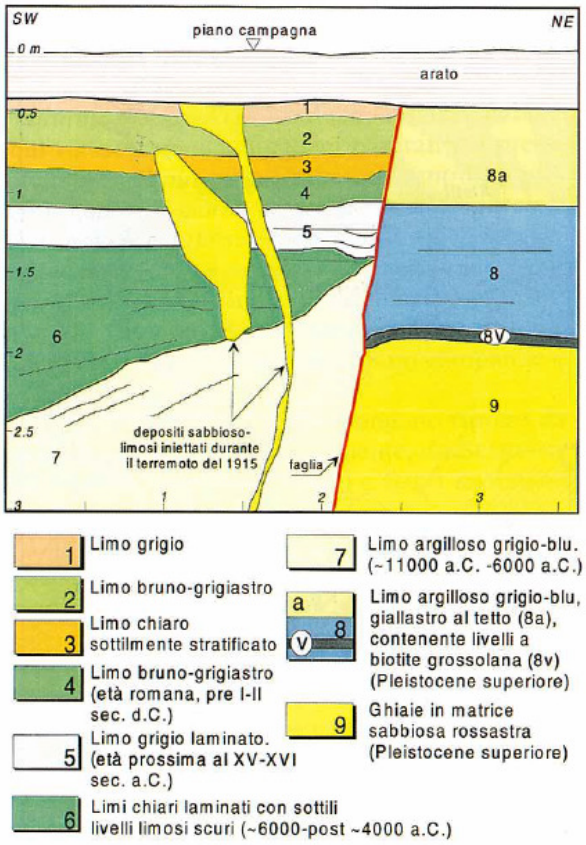


Figura 27 Sezione geologica schematica della parete settentrionale della trincea scavata in corrispondenza della faglia di Trasacco. La faglia è responsabile della dislocazione dei sedimenti lacustri di deposizione immediatamente precedente alla bonifica ottocentesca (da Galadini et..al 1997).

I due eventi che avrebbero portato alla rottura delle stalattiti devono avere avuto magnitudo elevata e devono essere avvenuti il primo in un periodo compreso tra 6.880+-115 anni B.P. e circa 6.000-6.200 B.P. anni, il secondo, dopo la fase di concrezionamento, quindi in un momento successivo a circa 6.000-6.200 anni B.P. . Quest'ultimo evento potrebbe corrispondere ad uno dei terremoti precedenti al 1915 già segnalati in altri lavori (Giraudi,1988;Brunamonte et al., 1991;Galadini et al.,1993,1999). E' molto probabile che l'evento che ha causato la rottura degli speleotemi coincide con una fase di movimento delle faglie di Casali d'Aschi riportate in Galadini et al (1993,1995), in particolare ad una di quelle precedenti la deposizione dei detriti conteneti ceramica dell'età del bronzo e del Neolitico. Lo studio degli speleotemi della grotta-riparo-Continenza ha contribuito pertanto ad evidenziare almeno un altro evento sismico olocenico ancora sconosciuto, databile al periodo compreso tra 6.880 e circa 6.000-6200 anni e quindi ad allungare indietro nel tempo il catalogo dei terremoti distruttivi che hanno colpito l'area fucense, incrementando la quantità di dati utilizzabili per valutare statisticamente i tempi di ritorno di tali eventi.

In chiusura si vuole riportare un immagine rappresentativa del lago del Fucino prima del prosciugamento che è risultata utile per trarre alcune considerazioni sulla storia urbanistica del comune e per la ricostruzione del modello del sottosuolo (*Fig.28*).

Dall'immagine si evince come lo sviluppo urbanistico del comune si sia spostato progressivamente verso occidente; la parte storica infatti si colloca sul lembo calcareo subaffiorante che, evidentemente, presenta basse amplificazioni del moto sismico.

La mancanza di documentazione storica presente nei dettagliati studi di Oddone e la scarsità di informazioni tratte dai quotidiani del gennaio 1915 possono far verosimilmente pensare che il centro storico non abbia subito danni gravissimi a seguito del forte evento sismico, a differenza delle ricche testimonianze inerenti i comuni limitrofi.

Un informazione risultata molto valida ai fini della ricostruzione del modello del sottosuolo è la presenza di acqua all'interno della "*Fossa Lapidaria*" che ha permesso di trarre valutazioni sull'assetto litostratigrafico locale.

Figura 28. Stralcio lago del Fucino prima del prosciugamento (da De Rotrou-Brisse, 1883).

Gioia dei Marsi, 10 Aprile 2013

Il Tecnico incaricato Dott.Geol. Michele Aureli

Il Collaboratore Dott.Geol. Luca Gentile Iorusso

10.Bibliografia

- ACCORDI B. (1964) - Lineamenti strutturali del Lazio e dell'Abruzzo meridionali. Mem. Soc. Geol. It., 4 (1): 595-633, 9 figg., Bologna.
- ACCORDI B., ANGELUCCI A., AVENA G.C., BERNARDINI F., BONI C.F., BRUNO F., CERCATO M., COPPOLA B., FIORE G., FUNICIELLO R., GIGLIO C., LA MONICA G.B., LUPIA PALMIERI E., MATTIOLI B. & PAROTTO M. (1969a) - Idrogeologia dell'alto bacino del Liri (Appennino centrale). Geol. Rom., 8, Roma.
- ALBARELLO D., BOSI V., BRAMERINI F., LUCANTONI A., NASO G., PERUZZA L., REBEZ A., SABETTA F. & SLEJKO D., 2000 – Carte di pericolosità sismica del territorio nazionale. Quaderni di Geofisica, 12, 1-7.
- ALFONSI L, SAGNOTTI L and GALADINI F 1995 – Paleomagnetism of the Plio-Pleistocene continental sediments from the north-eastern edge of the Fucino basin (Central Italy). Istituto Nazionale di Geofisica, Roma, Italy.
- ARSSA (Agenzia Reg.le per i servizi di sviluppo Agricolo-Abruzzo.
- APAT (1965) - F° 152 "Sora" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000
- APAT (2005) - PROGETTO IFFI Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia.
- BONCIO P., GALADINI F., FRANCESCO VISINI F., PACE B. & LAVECCHIA G. (2006) - ESCURSIONE AL BACINO DEL FUCINO: EVIDENZE DI TETTONICA DISTENSIVA ATTIVA E SISMOGENETICA IN APPENNINO CENTRALE
- BONCIO P. & LAVECCHIA G. (2000) - A structural model for active extension in Central Italy. J. Geodyn., 29, 233-244.
- BONCIO P., LAVECCHIA G. & PACE B. (2004) – Defining a model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: the case of central Apennines (Italy).Journal of Seismology, 8/3, 407- 425.
- BOSI C., CAIAZZO C., CINQUE A. & MESSINA P. (1996) - Le superfici relitte della regione fucense (Appennino centrale) ed il loro possibile significato nella ricostruzione della evoluzione geologica. Il Quaternario, It. J. Quat. Sci., 9 (1): 381-386, 2 figg., 1 tav., Verona.
- BOSI C., GALADINI F. & MESSINA P. (1995) - Stratigrafia Plio-Pleistocenica della Conca del Fucino. Il Quaternario, It. J. Quat. Sci., 8 (1): 83-94, Verona.
- Burri E. e Petitta M. (1999) – Farming and water management in the Fucino Plain (Central Italy) in the last century. *International Commission on Irrigation and Drainage*, Poster Session Q. 48 – P. 45, pp. 257-268.
- CAVINATO G.P., CARUSI C., DALL'ASTA M., MICCADEI E. & PIACENTINI T. (2002) -Sedimentary and tectonic evolution of Plio-Pleistocene alluvial and lacustrine deposits of Fucino basin (Central Italy). Sedimentary Geology 148 (2002) 29–59.
- Castenetto S. & Galadini F. (EDS.) (1999) –13gennaio 1915: Il terremoto nella Marsica, SSNCNR, Roma, 789 pp.
- Celico P. (1979) – Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale. *Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata dell'Università di Napoli*, 14, pp. 1-97.
- CENTAMORE E., CRESCENTI U. & DRAMIS F. Eds. (2006) - Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 368 "Avezzano", Servizio Geologico d'Italia, APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, pp. 115, Firenze .
- Ciotoli, G., M. Guerra, S. Lombardi, and A.Annnunziatellis (2007) – Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin:Fucino Plain, central Italy. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112,.
- Ciotoli, G., M. Guerra, S. Lombardi, and E. Vittori (1998), Soil gas survey for tracing seismogenic faults: A case study in the Fucino Basin, central Italy, J. Geophys. Res., 103, 23,781– 23,794.
- D'ADDEZIO G. e VALENSISE G (1998) – Il Terremoto di Avezzano-Guida alla riscoperta degli effetti del terremoto sull'ambiente naturale. Istituto Nazionale di Geofisica.
- D.M. 14 gennaio 2008- "Norme Tecniche per le costruzioni" e CIRCOLARE 02.02.2009.
- Ente per la Valorizzazione del Fucino (1957) Studio geofisico nel comprensorio del Fucino.Craelius, Roma, 23 pp.
- FREZZOTTI M. & GIRAUDI C., 1989 - Evoluzione geologica Tardo-Pleistocenica ed Olocenica del conoide complesso di Valle Majelama. Il Quaternario, 33-50.
- FREZZOTTI M. & GIRAUDI C., 1986 – Utilizzazioni di immagini Landsat TM nello studio Geologico di Aree di Pianura:l'esempio della piana del Fucino. Mem.Soc.Geol.It. 881-886,4ff.
- GALLI P. (2000): New empirical relationships between magnitude ande distance for liquefaction. Tectonophysics 324 (2000) 169–187 .
- GALADINI, F. & GALLI P. (1999) - The Holocene paleoearthquakes on the 1915 Avezzano earthquake faults (central Italy); implications for active tectonics in the central Apennines. Tectonophysics, 308: 143-170.
- Galadini, F., Galli, P., 1999. The Holocene paleoearthquakes on the 1915 Avezzano earthquake faults (central Italy): implications for active tectonics in Central Apennines. Tectonophysics 308, 143–170.

- Galadini, F. and Galli, P., 2000, Active tectonics in the central apennines (Italy)—input data for seismic hazard assessment. Natural Hazards 22, 225–270.
- Galadini, F., Galli, P., Giraudi, C. and Molin, D., 1995, Il terremoto del 1915 e la sismicit`a della piana del Fucino (Italia Centrale). Boll. Soc. Geol. It. 114, 635–663.
- Galadini, F. and Messina, P., 1994, Plio-Quaternary tectonics of the Fucino basin and surrounding areas (central Italy). Giornale di Geologia 56, 73–99.
- GIRAUDI C. (1986) – Faglie ad attività olocenici nella piana del Fucino (Abruzzo). Prestampe Atti 73 Congresso Soc. Geol. It., 3636-366
- GIRAUDI C. (1988b) - Evoluzione geologica della Piana del Fucino (Abruzzo) negli ultimi 30.000 anni. Il Quaternario, 1 (2): 131 - 159, Torino.
- Giraudi C. (1988): Evoluzione geologica della Piana del Fucino (Abruzzo) negli ultimi 30.000 anni. *Il Quaternario*, **1**, 131-159.
- Gruppo di Lavoro CPTI, 1999. Catalogo Parametrico Dei Terremoti Italiani, ING, GNDT, SGA, SSN, Bologna, 92 pp. (http://emidius.itim.mi.cnr.it/CPTI/home.html).
- Gruppo di Lavoro MS (2008) – Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Provincie autonome, Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Cd-rom.
- Gruppo di Lavoro MS–AQ (2010) Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana. Regione Abruzzo – Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom.
- http://emidius.mi.ingv.it/CPTI- a cura di A. Rovida, R. Camassi, P. Gasperini e M. Stucchi - 2011. CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Milano, Bologna.
- http://sgi1.isprambiente.it/GeoMapViewer/index.html.
- INGV - Mappa di Pericolosità Sismica del Territorio Nazionale.
- Lavecchia G., Boncio P.,. Brozzetti F, De Nardis R., Pace B., Visini F. – Studio della pericolosità sismica della regione Abruzzo – Geosis-Lab, Ud'A, Chieti 2006.
- Oddone – Gli elementi fisici del Grande Terremoto Marsicano del 13 gennaio 1915.
- Piano Stralcio per l'Assetto idrogeologico-Rischio Frana-Bacino dei Fiumi Liri Garigliano e Volturno- Norme di Attuazione e misure di Salvaguardia.
- Piccardi, L., 1993. Tettonica attiva in Appennino centrale e meridionale: surface displacement, Bull. seism. Soc. Am., 84, 947–1002. esempi dal bacino del Fucino e area Irpina, Tesi di Dottorato di Westaway, R.W.C., 1990. Present-day kinematics of the plate boundary Ricerca, Firenze.
- Saroli et al., (2008)
- Vezzani L. & Ghisetti F. (1998) - Carta Geologica dell'Abruzzo, scale 1:100,000. S.EL.CA., Firenze.
- ZARLENGA F. (1987) – I depositi continentali nel bacino del Fucino – ENEA,Roma- Geologica Rom. 223-253,33 fig.

11.Allegati

- **Carta delle indagini**
- **Carta Geologico Tecnica**
- **Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica e delle Frequenze di Risonanza**