



PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI

MESSA IN SICUREZZA DEL SISTEMA ACQUEDOTTISTICO DEL PESCHIERA PER L'APPROVVIGIONAMENTO IDRICO DI ROMA CAPITALE E DELL'AREA METROPOLITANA

IL COMMISSARIO STRAORDINARIO ING. PhD MASSIMO SESSA

SUB COMMISSARIO ING.

acea
acqua
ACEA ATO 2 SPA



IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Ing. PhD Alessia Delle Site

SUPPORTO AL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Avv. Vittorio Gennari

Sig.ra Claudia Iacobelli

Ing. Barnaba Paglia

acea
Ingegneria
e servizi



CONSULENTE

Ing. Biagio Eramo

ELABORATO

A250PDS R003 1

COD. ATO2 AAM10118

DATA DICEMBRE 2021

SCALA

Progetto di sicurezza e ammodernamento
dell'approvvigionamento della città
metropolitana di Roma

"Messa in sicurezza e ammodernamento del sistema
idrico del Peschiera",

L.n.108/2021, ex DL n.77/2021 art. 44 Allegato IV

AGG. N.	DATA	NOTE	FIRMA
1	03/22	AGGIORNAMENTO ELABORATI CSLLPP	
2			
3			
4			
5			
6			

Sottoprogetto
NUOVO ACQUEDOTTO MARCIO – I LOTTO
DAL MANUFATTO ORIGINE AL SIFONE CERASO
(con il finanziamento dell'Unione
europea – Next Generation EU)

**PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA
ED ECONOMICA**

TEAM DI PROGETTAZIONE

CAPO PROGETTO

Ing. Angelo Marchetti

GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA

Geol. Stefano Tosti

Hanno collaborato:

Ing. Geol. Eliseo Paolini

Geol. PhD Paolo Caporossi

Geol. Simone Febo

Geol. Yousef Abu Sabha

Geol. Filippo Arsie



RELAZIONE GEOLOGICA

CONSULENTI:

CERI – Centro di Ricerca, Previsione e Controllo dei Rischi Geologici

Indice

1.	Premessa	3
1.1	Descrizione della soluzione progettuale prescelta ed articolazione in lotti funzionali ...	5
2.	Inquadramento geografico, geologico e strutturale generale	8
2.1	Assetto geologico di dettaglio	15
2.1.1	Depositi pre-orogenici – Dominio Sabino	17
2.1.2	Depositi pre-orogenici – Dominio di Piattaforma carbonatica laziale abruzzese	24
2.1.3	Depositi pre-orogenici – Successione carbonatica miocenica	26
2.1.4	Depositi sin-orogenici – Successione terrigena miocenica	29
2.1.5	Depositi post-orogenici – Unità sedimentarie post-orogeniche continentali.....	30
2.1.6	Depositi post-orogenici – Depositi ubiquitari	36
3.	Assetto geologico strutturale di dettaglio dell'area	39
3.1	Unità tettoniche	39
3.1.1	Unità compresa tra il sovrascorrimento del Torrente Licenza-Monti Elci-Monte Tancia e la linea Olevano-AnTRODoco (U4).....	40
3.1.2	Unità di letto della linea Olevano-AnTRODoco (U5)	44
4.	Caratterizzazione idrogeologica	45
4.1	Inquadramento idrogeologico regionale.....	45
4.2	Caratterizzazione idrogeologica dell'area di indagine.....	47
4.2.1	Complessi idrogeologici	47
4.2.2	Analisi idrogeochimica.....	52
4.2.3	Analisi idrogeologica quantitativa – Misure di portata	67
4.2.4	Analisi idrogeologica quantitativa – Misurazione e ricostruzione piezometrica	75
4.3	Interazione tracciati di progetto ed acquiferi	87
5.	Inquadramento geomorfologico.....	94
5.1	Instabilità gravitative.....	94
5.2	Fenomeni di esondazione	97
5.3	Evidenze di fenomeni di subsidenza.....	100
5.4	Processi carsici.....	106
5.4.1	Rischio sinkhole e tracciato di progetto	112
5.5	Rischio gas nel sottosuolo	113
5.6	Vincoli geologici / geomorfologici lungo il tracciato	114
6.	Caratterizzazione sismica dell'area	115
6.1	Pericolosità sismica di base.....	122
6.2	Suscettibilità alla liquefazione	125

6.2.1	Manufatto Origine	129
6.2.2	Piana di Mola di Regno	133
6.2.3	Piana di Pantano	136
6.2.4	Manufatto Nodo A	141
7.	Indagini geognostiche e geofisiche	144
7.1	Stratigrafie dei sondaggi	147
7.2	Prove geotecniche di sito.....	147
7.2.1	Monitoraggio piezometrico.....	148
7.2.2	Standard Penetration Test (S.P.T.)	148
7.2.3	Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTu)	153
7.2.4	Prova Pressiometrica (MPM)	175
7.2.5	Prova di permeabilità Lefranc.....	178
7.3	Prove di laboratorio geotecnico	181
7.3.1	Caratterizzazione dello stato dei materiali in sito	182
7.3.2	Prova edometrica	187
7.3.3	Prova ad espansione laterale libera (ELL)	189
7.3.4	Prova di taglio diretto (TD)	192
7.3.5	Colonna risonante (RC)	195
7.3.6	Prova di compressione uniassiale	195
7.3.7	Prova triassiale in roccia.....	196
7.4	Indagini geofisiche	197
7.4.1	Prospezione microgravimetrica.....	197
7.4.2	Prospezioni geoelettriche con tecnica tomografica 2D e 3D	202
7.4.3	Prospezioni sismiche a rifrazione con tecnica tomografica	214
7.4.4	Prospezioni sismiche a riflessione	229
7.4.5	Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	235
7.4.6	Misure di frequenza fondamentale con metodo HVSR	237
7.4.7	Prova sismica in foro di tipo Down Hole.....	238
7.5	Rilievo aerofotogrammetrico 3D mediante SAPR.....	241
8.	Aspetti geotecnici – geomeccanici e strutturali	244
8.1	Ammassi rocciosi - Caratterizzazione geomeccanica da rilevamento di campagna...244	
8.2	Ammassi Rocciosi – Unità Litotecniche sulla base del rilevamento geomeccanico256	
8.3	Unità Litotecniche.....	257
9.	Considerazioni conclusive	264

Gli Allegati alla presente Relazione Geologica sono organizzati come di seguito riportato:

ALLEGATO S1- S2: Sondaggi S1 e S2, prove in situ, prove di laboratorio, down-hole;

ALLEGATO S3BIS: Sondaggio S3 BIS, prove in situ, prove di laboratorio, down-hole.

ALLEGATO S3: Sondaggio S3, prove in situ, prove di laboratorio, MASW, HVSR;

ALLEGATO S4_S6_S8_S12_S13: Sondaggi S4, S6, S8, S12, S13, prove in situ, prove di laboratorio, MASW, HVSR, down-hole.

ALLEGATO S7: Sondaggio S7, prove in situ, prove di laboratorio, down-hole;

ALLEGATO S9: Sondaggio S9, prove in situ, prove di laboratorio;

ALLEGATO S14: Sondaggio S14, prove in situ, prove di laboratorio;

ALLEGATO S14BIS: Sondaggio S14 BIS, prove in situ, down-hole;

ALLEGATO CPTU PANTANO MOLA DI REGNO: Prove penetrometriche statiche CPTu – Piana di Mola di Regno – Pantano.

ALLEGATO GEOFISICA MOLA DI REGNO: Indagini geofisiche eseguite sulla Piana di Mola di Regno (Indagine geoelettrica con ricostruzione tomografica, profili sismici a rifrazione con ricostruzione tomografica, prospezioni di sismica a riflessione, MASW);

ALLEGATO GEOFISICA PANTANO: Indagini geofisiche eseguite sulla Piana di Pantano (Indagine geoelettrica con ricostruzione tomografica, profili sismici a rifrazione con ricostruzione tomografica);

ALLEGATO GEOELETTRICA NODO A: Indagine geoelettrica con ricostruzione tomografica eseguita presso il Manufatto Nodo A;

ALLEGATO GEOFISICA PONTE ANTICOLI: Indagini geofisiche eseguite presso Ponte Anticoli (Indagine geoelettrica con ricostruzione tomografica, profili sismici a rifrazione con ricostruzione tomografica, prospezioni di sismica a riflessione);

ALLEGATO GEOFISICA VECCHIA FERROVIA EST: Indagini geofisiche eseguite presso Via della Vecchia Ferrovia – Lato Est (Profili sismici a rifrazione con ricostruzione tomografica, prospezioni di sismica a riflessione);

ALLEGATO GEOFISICA VECCHIA FERROVIA EST: Indagini geofisiche eseguite presso Via della Vecchia Ferrovia – Lato Ovest (Profili sismici a rifrazione con ricostruzione tomografica, prospezioni di sismica a riflessione);

ALLEGATO MICROGRAVIMETRIA: Prospezione microgravimetrica eseguita presso la Piana di Mola di Regno.

1. Premessa

La presente Relazione Geologica, facente parte del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica (PFTE) del Nuovo Acquedotto Marcio, è redatta in conformità a quanto stabilito dal D.Lgs. n.50 del 18 aprile 2016 e regolamenti attuativi collegati e nel rispetto delle Linee Guida per la redazione del PFTE approvate dal C.S.LL.PP. in data 29/07/2021 (par. 3.2 – punto 1).

Come previsto dalle Linee Guida sopra citate, il PFTE rappresenta un primo livello di progettazione, rinnovato per contenuti e metodologia, anche mediante l'utilizzo di adeguati strumenti a supporto delle decisioni.

Per le "grandi opere" dell'allegato IV al citato decreto-legge 31 maggio 2021, n. 77, nell'ambito delle quali si colloca il presente progetto, il PFTE si incardina su un modello procedimentale integrato del tutto innovativo (parere del Comitato speciale del Consiglio superiore dei lavori pubblici + eventuale dibattito pubblico + procedimento di VIA + verifica preventiva dell'interesse archeologico + conferenza di servizi), finalizzato a concludersi con una rigorosa verifica di ottemperanza alle prescrizioni impartite sul progetto prima dell'avvio della fase di affidamento, a garanzia della effettiva cantierabilità dell'opera.

La presente Relazione Geologica è redatta, inoltre, ai sensi del D.M. 11/03/1988 "*Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*" e del nuovo D.M. 17/01/2018 "*Norme Tecniche per le Costruzioni*".

La presente Relazione Geologica è tesa a sviluppare la soluzione progettuale individuata sulla scorta delle analisi effettuate nel Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali (DOCFAP), al quale si rimanda per ogni necessario approfondimento, ed illustra il quadro litostratigrafico, geomorfologico, idrogeologico e sismico dell'area in esame ed i risultati delle prove geognostiche, geofisiche e di laboratorio geotecnico effettuate.

1.1 Descrizione della soluzione progettuale prescelta ed articolazione in lotti funzionali

L'oggetto dell'intervento è la realizzazione della prima fase funzionale di un nuovo sistema acquedottistico che miri al perseguimento di obiettivi connessi al ripristino della piena funzionalità ed efficienza del sistema di adduzione esistente, alla garanzia di un'adeguata protezione igienico – sanitaria della risorsa trasportata, all'eliminazione delle perdite idriche che attualmente affliggono entrambi gli acquedotti esistenti, alla realizzazione di un sistema in grado di addurre l'intera portata di concessione ed alla tutela di una idonea flessibilità, ispezionabilità, monitorabilità e manutenibilità al sistema. Allo scopo di perseguire obiettivi e requisiti sopra descritti e nell'ottica della massima resilienza, la totalità della nuova infrastruttura, all'interno della quale ricade la prima fase funzionale di progetto, sarà composta da una doppia tratta acquedottistica che si sviluppa secondo due tracciati denominati TR2 e TR4, connessi con il sistema esistente nei pressi del Manufatto Origine degli Acquedotti e in prossimità del manufatto di Casa Valeria.

La prima fase funzionale del Nuovo Acquedotto Marcio prevede la realizzazione di una prima tratta di tale sistema che permette di derivare l'attuale portata del sistema tra il manufatto origine esistente e un nodo di connessione situato all'altezza di un manufatto appartenente al sistema oggi in esercizio, denominato sifone Ceraso.

Le opere di progetto di nuova realizzazione prevedono i seguenti manufatti e macrotratti (Tabella 1.1.1 e Tabella 1.1.2):

Tabella 1.1.1: Nomenclatura dei manufatti di nuova realizzazione

Nome	Descrizione
MCR	Manufatto di Casetta Rossa
MNA	Manufatto Nodo A
TR2PZ1	TR2: pozzo di partenza MT
TR2PZ7	TR2: pozzo di partenza MT e manufatto interconnessione
TR4PZ1-8	Tratta 4: pozzi arrivo/partenza MT

Tabella 1.1.2: Nomenclatura dei macrotratti

Nome	Descrizione
TC1	Tratto comune iniziale: al Manufatto Origine degli Acquedotti a Ponte Anticoli (nodo A)
TR2M1	Tratta 2: dal nodo A al primo pozzo di spinta (TR2PZ1) – apprestamento per la prosecuzione dei lavori sulle fasi successive
TR4M1	Tratta 4: dal nodo A alla prima interconnessione (TR2PZ7 – TR4PZ7) con realizzazione del tratto TR4PZ7 – TR4PZ8 come apprestamento per la prosecuzione dei lavori sulle fasi successive

Tabella 1.1.3: Articolazione della Prima Fase Funzionale.

OPERE DI PROGETTO PRIMA FASE FUNZIONALE	
TRATTO	MANUFATTO
TRATTO TC1	MANUFATTO DI CASSETTA ROSSA (MCR)
	MANUFATTO NODO A (MNA) e pozzo di arrivo TR2M1/TR4M1
TRATTO TR2M1	TR2PZ1 - pozzo di spinta
TRATTO TR4M1	TR4PZ1 - pozzo di spinta
	TR4PZ2 - pozzo di arrivo
	TR4PZ3 - pozzo di spinta con soglia
	TR4PZ4 - pozzo di arrivo
	TR4PZ5 - pozzo di spinta con soglia
	TR4PZ6 - pozzo di arrivo
	TR2PZ7- pozzo di spinta e manufatto interconnessione
	Opera di scarico 1 - Manufatto interconnessione
	TR4PZ8 - pozzo di arrivo

Per un maggior dettaglio dei macrotratti e dei relativi manufatti, si rimanda alla Relazione Generale (A250PDS R001 0).

RELAZIONE GEOLOGICA

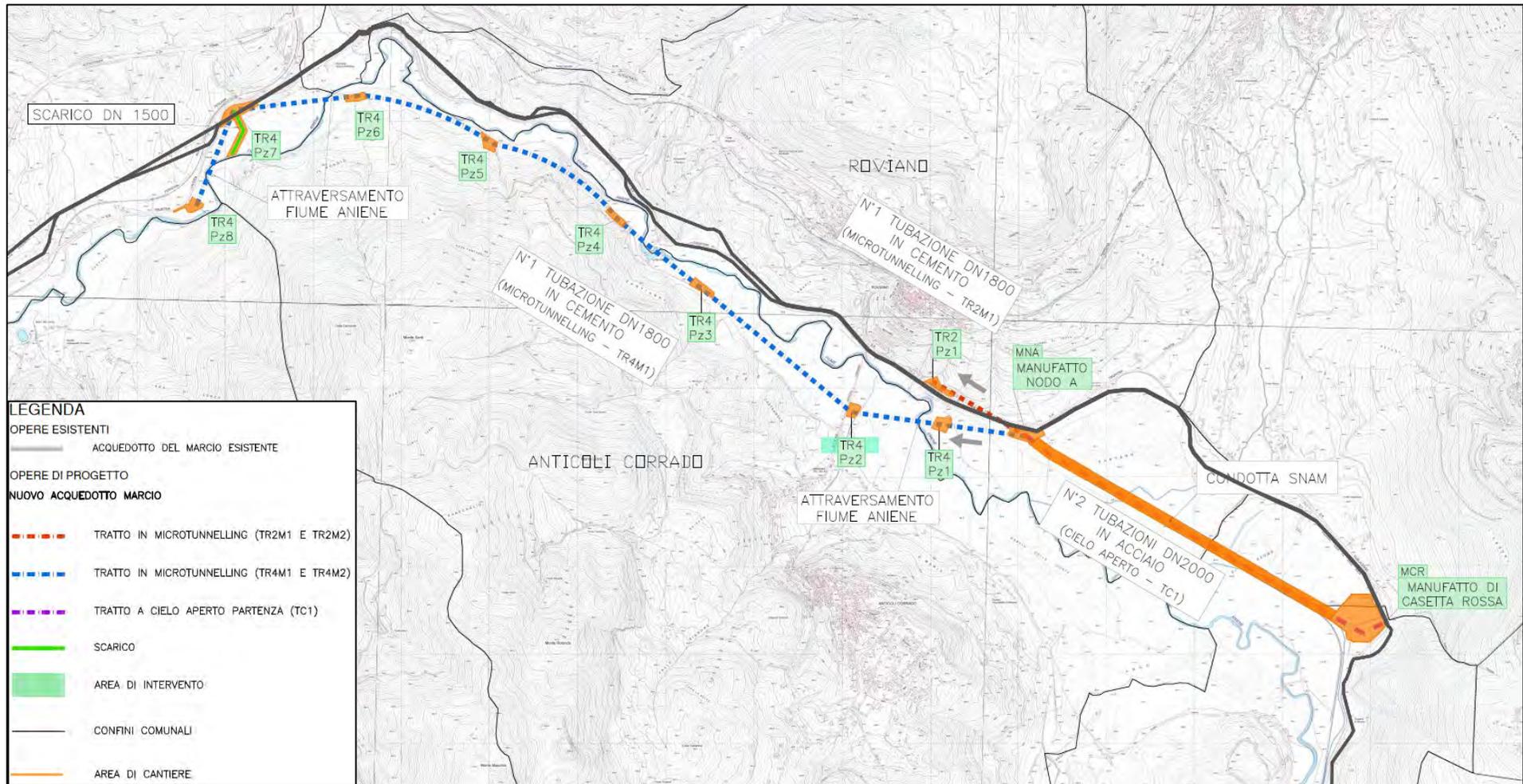


Fig. 1.1.1: Articolazione in planimetria della Prima Fase Funzionale.

2. Inquadramento geografico, geologico e strutturale generale

L'area di studio investigata per la nuova opera rientra nell'ambito del territorio della Provincia di Roma interessando dal punto di vista amministrativo i seguenti comuni: Marano Equo, Arsoli, Roviano, Anticoli Corrado, Cineto Romano, Mandela, Saracinesco, Vicovaro, San Polo dei Cavalieri e Tivoli.

L'area di studio si sviluppa lungo la Valle dell'Aniene, in provincia di Roma e comprende in particolare il tratto di valle compreso tra i comuni di Agosta e Tivoli. Tale zona è caratterizzata dalla presenza del Fiume Aniene che ne determina la vallata principale. L'asta fluviale, di una lunghezza pari a circa 30 km, riceve lungo il suo percorso il contributo di alcuni effluenti tra cui il Torrente Fiumicino, il Fosso dell'Empiglione, il Torrente Licenza, il Torrente Ferrata, il Fosso dei Ronci.

L'area attraversata dal Fiume Aniene è prevalentemente montuosa (dorsali dei Monti Simbruini, Monti Cantari, Monti Affilani, Monti Ruffi) con rilievi che si aggirano intorno ai 2.000 mt. (Monte Autore, Monte Cotento, Monte Tarino, Monte Viglio).

L'Aniene percorre, nella media e alta valle, una delle zone geologicamente più complesse dell'Appennino centrale. In questo settore geografico, l'Appennino è caratterizzato dalla presenza di due grandi domini paleogeografici, dalla cui evoluzione ha avuto origine l'attuale paesaggio.

L'area di intervento riguarda, quindi, un sistema vallivo ben definito e geograficamente omogeneo, che si estende con continuità lineare lungo il Fiume Aniene articolandosi attorno all'insieme dei bacini idrografici e dei territori che da esso dipendono.

Il territorio è, grazie alla natura carsica del terreno, straordinariamente ricco di sorgenti, di portata molto differenziata, nell'insieme capaci di fare della Valle una grande dispensa d'acqua. In particolare, le sorgenti più importanti, sono quelle presenti nei territori di Agosta e Marano Equo.

Il territorio della Media valle dell'Aniene è costituito dalla porzione di territorio attraversata dal fiume e compresa fra i centri di Tivoli e Subiaco. I territori dei comuni presenti in quest'area hanno caratteristiche orografiche molto simili fra loro, con valli e colline che si susseguono; sono centri di piccole dimensioni con poca popolazione insediata. Le abitazioni sono solitamente concentrate in centri abitati, con conseguente limitata urbanizzazione del territorio. L'Appennino Centrale è un sistema catena-

avanfossa vergente verso il Mare Adriatico (Bally et al., 1986; Patacca et al., 1991; Cosentino et al., 2010) e la sua strutturazione avviene per effetto della subduzione verso W della crosta continentale che costituisce l'avampaese adriatico (Doglioni et al., 1996). La fase orogenica compressiva ha inizio nel Miocene e procede tramite la migrazione verso NE del fronte compressivo, tuttora in atto (Bally et al., 1986; Boccaletti et al., 1990; Patacca et al., 1991). Durante la fase orogenica giocano un ruolo molto importante le numerose faglie dirette pre-orogeniche che controllano la fisiografia dei bacini di avanfossa e influiscono sulle traiettorie dei sovrascorrimenti più importanti (Bigi & Costa Pisani, 2005; Tavarnelli et al., 2004; Carminati et al., 2014).

A partire dal Pliocene superiore (Galadini & Galli, 2000) le porzioni più interne della catena sono interessate da un'intensa tettonica distensiva, collegata all'apertura del Mar Tirreno, che ribassa i settori sud-occidentali della stessa con rigetti di centinaia di metri. A questa fase deformativa è legata una intensa attività vulcanica pleistocenica nei settori peritirrenici (Peccerillo, 1985; Chiarabba et al., 1997; Carminati et al., 2012).

Attualmente, nella maggior parte della catena appenninica predomina quest'ultimo regime distensivo, mentre la compressione è limitata alla stretta fascia frontale periadriatica. In tale contesto anche le zone di massimo sollevamento della catena, di solito associate alla costruzione della struttura compressiva, sono invece caratterizzate da un regime estensionale (Carminati & Doglioni, 2012).

L'area studiata segue l'andamento della valle del Fiume Aniene, che si sviluppa tra le dorsali dei Monti Ruffi e dei Monti Tiburtini in sinistra idrografica, mentre in destra idrografica si collocano i Monti Simbruini e i Monti Sabini/Lucretili. Dal punto di vista della cartografia geologica ufficiale, l'area in cui l'Acquedotto Marcio ricade in 4 fogli geologici in scala 1: 50.000; in particolare, coinvolge i fogli n. 366 "Palombara Sabina", n. 367 "Tagliacozzo", n. 375 "Tivoli" e n. 376 "Subiaco" (Servizio Geologico d'Italia, 1998, 2005, 2017 a, b)

Ad eccezione dei Monti Simbruini, che appartengono al dominio paleogeografico della Piattaforma Carbonatica Laziale-Abruzzese, caratterizzata da una potente (> 4 km) successione calcareo-dolomitica mesozoica e miocenica (Damiani et al., 1990, 1991; Cosentino et al., 2010; Fabbi, 2016), nelle restanti dorsali affiorano estesamente le unità del dominio di transizione Sabino (Parotto & Praturlon, 1975; Cosentino, 1986; Cosentino et al., 1993; Bollati et al., 2011; Carminati et al., 2013). Queste sono rappresentate da termini pelagici con abbondante materiale risedimentato, esportato

dalla Piattaforma Laziale-Abruzzese per tutto l'intervallo Giurassico-Paleogene (Corda & Mariotti, 1986; Galluzzo & Santantonio, 2002; Cipriani et al., 2020), mentre a partire dal Miocene si registra una progressiva progradazione dei depositi di rampa carbonatica (i.e. Calcarei a Briozoi e Litotamni). Il coinvolgimento nelle fasi deformative orogeniche è testimoniato dall'annegamento della rampa miocenica, dalla messa in posto di pochi metri di emipelagiti a foraminiferi planctonici, e dall'accumulo di importanti spessori di torbiditi silicoclastiche in contesti di avanfossa (Cosentino et al., 2003).

Le strutture sabine sono delimitate verso est dal sistema di sovrascorrimenti noto come "Linea Olevano-Antrodoco" (Salvini & Vittori, 1982), verso ovest sono invece delimitate dal complesso di depressioni e valli che costituiscono il Bacino Tiberino e la piana delle Acque Albule (Fig. 2.1).

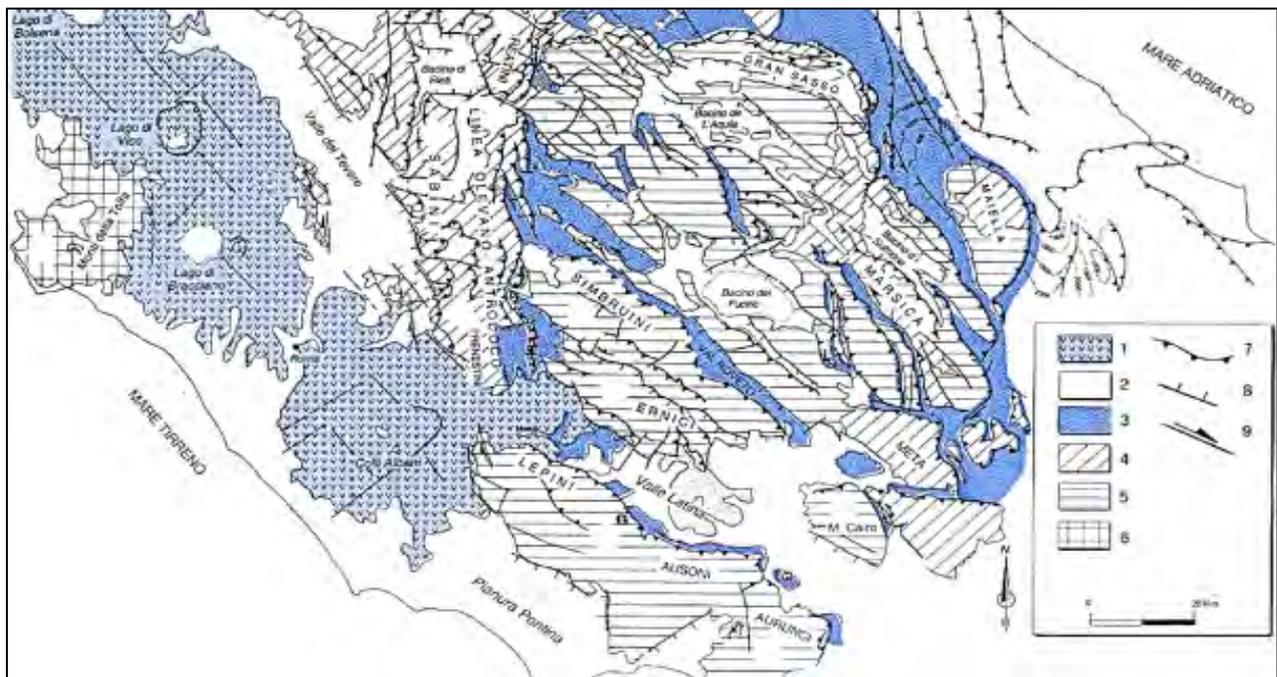


Fig. 2.1: Schema geologico dell'Appennino Centrale; il rettangolo rosso indica l'area oggetto del presente studio. Legenda: 1- vulcaniti pleistoceniche; 2- depositi continentali plio-quadernari; 3- depositi silicoclastici mio-pliocenici; 4- depositi di transizione (dominio Sabino); 5- depositi di piattaforma Laziale-Abruzzese; 6- Complesso Tolfetano-Cerite; 7- Principali sovrascorrimenti; 8- Faglie dirette; 9- Faglie trascorrenti (da Bigi et al., 1990, modificato).

Le successioni del dominio di transizione Sabino sono strutturate in 4 principali unità tettono-stratigrafiche limitate da sovrascorrimenti est-vergenti (Cosentino & Parotto, 1991). Tali unità sono numerate 1, 2, 3 e 4, da Est verso Ovest, e i sovrascorrimenti che li delimitano sono denominati (Fig. 2.2): 1 - Sovrascorrimento di M. Morra (indicato

in verde in Fig. 2.2), 2 – sovrascorrimento di M. Sterparo-M. Castelvechio (indicato in arancione in Fig. 2.2), 3 – sovrascorrimento del T. Licenza-M. Elci-M. Tancia (indicato in blu in Fig. 2.2), 4 – Linea Olevano-Antrodoco (indicata in rosso in Fig. 2.2). La Linea Olevano-Antrodoco determina l'accavallamento delle unità sabine sul dominio di piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese, nonché sui depositi flyschoidi di avana fossa altomiocenici (Salvini & Vittori, 1982, Damiani, 1985, Cosentino et al., 1993; 2010), affioranti nel settore orientale dell'area studiata, fino allo sbarramento di Roviano; nell'area studiata affiora soltanto una porzione di uno dei segmenti più meridionali di questo elemento tettonico di rilevanza regionale, denominato Linea Olevano-Anticoli Corrado (Damiani, 1985). L'unità di letto della Linea Olevano-Antrodoco è indicata come unità 5 in Fig. 2.2.

L'area in studio è compresa nelle unità 3, 4 e 5, ovvero tra il sovrascorrimento Castelvechio-M. Sterparo e il letto della Linea Olevano-Antrodoco, ma presenta anche una limitata porzione dell'unità 2 a sud di Tivoli (Colle Ripoli).

Le strutture compressive vennero deformate e dislocate dalla tettonica estensionale plio-quadernaria, connessa con l'apertura del Mar Tirreno, andando anche a controllare il decorso del Fiume Aniene nei settori orientali dell'area analizzata (settore Agosta-Cineto Romano).

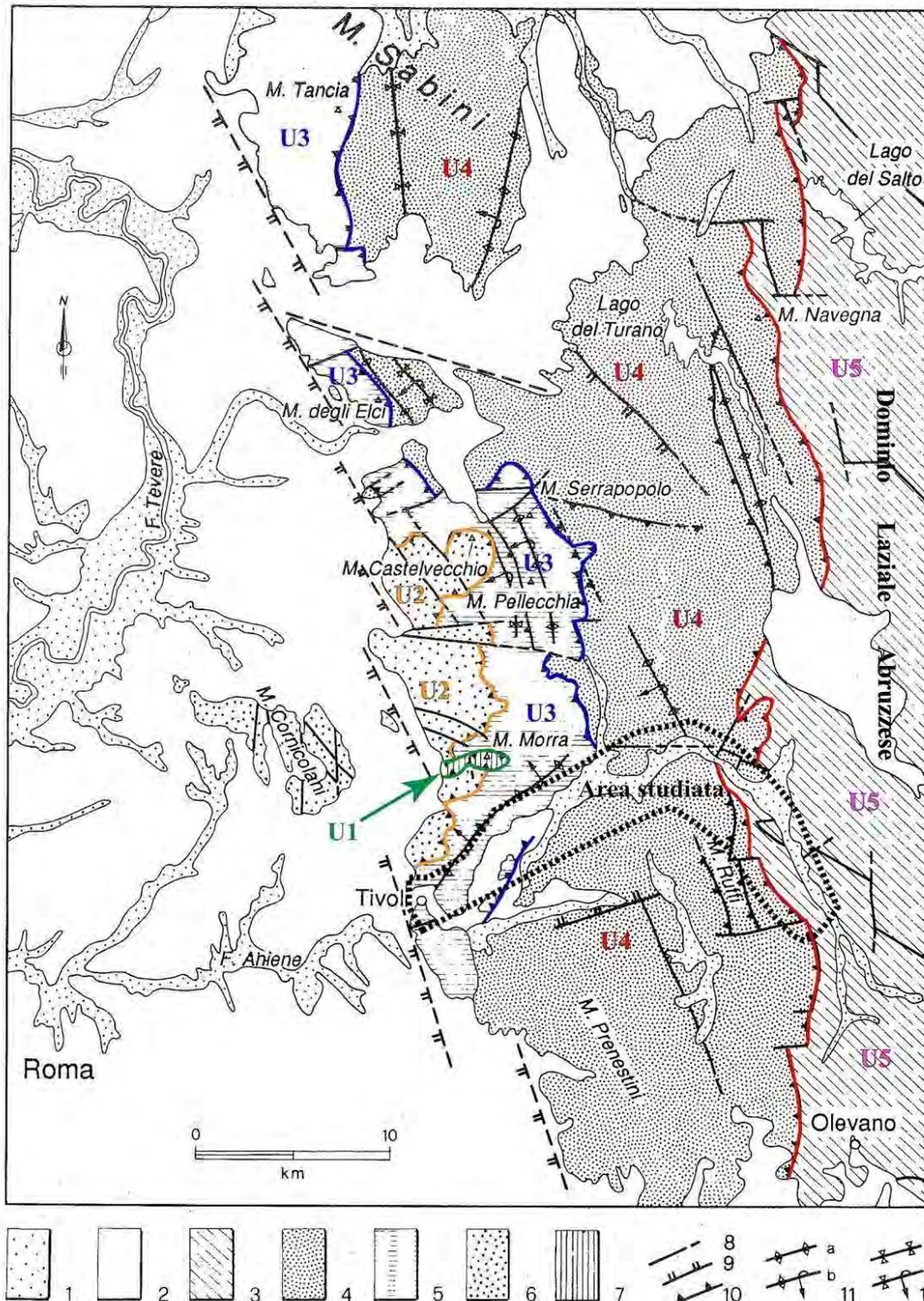


Fig 2.2: Inquadramento tettonico dei M. Sabini; in bianco sono indicate le vulcaniti ed i sedimenti plio-pleistocenici; le varie unità tettoniche e i sovrascorrimenti che le delimitano sono indicate con colori diversi: verde = U1 – sovrascorrimento di M. Morra; arancione = U2 – sovrascorrimento di M. Sterparo-M. Castelvecchio; blu = U3 - sovrascorrimento di T- Licenza-M. Elci-M. Tancia; rosso = U4 – Linea Olevano-Antrodoco. L’U5 (rosa) è l’unità di letto della Linea Olevano Antrodoco, riferibile al Dominio di Piattaforma Carbonatica Laziale Abruzzese (da Cosentino & Parotto, 1991, modificato).

Le formazioni pre-orogeniche affioranti nell'area studiata sono unità essenzialmente calcaree e calcareo-marnose di età Giurassico-Miocene, appartenenti alla successione stratigrafica del Bacino Sabino (Galluzzo & Santantonio, 2002; Bollati et al., 2011), e, limitatamente alla porzione orientale dell'area in esame (Monti Simbruini e area di Marano Equo), carbonati di piattaforma di età Cretaceo-Miocene (Damiani et al., 1998; Compagnoni et al., 2005). Il Bacino Sabino si origina a partire dalla fase estensionale che nel Giurassico Inferiore provoca la differenziazione di numerosi domini paleogeografici in un ampio settore della Tetide occidentale, precedentemente caratterizzato da sedimentazione carbonatico-evaporitica di acque basse (Santantonio & Carminati, 2011). Tale fase tettonica causa lo sprofondamento dei settori al tetto delle faglie giurassiche (Fig. 2.3), nei quali si instaurano condizioni di sedimentazione essenzialmente pelagiche (Bacino Sabino, Bacino Umbro-Marchigiano, Bacino Toscano), mentre nei settori al letto delle *master-faults* si registra la persistenza di sedimentazione di acque basse (Piattaforma Carbonatica Laziale-Abruzzese, Piattaforma Apula, Piattaforma Campana). La sedimentazione nel Bacino Sabino risente della vicinanza della Piattaforma Laziale-Abruzzese, come testimoniato dai notevoli volumi di materiale neritico risedimentato all'interno delle unità pelagiche, messi in posto attraverso flussi gravitativi (*torbiditi*, *grain flows*, *debris flows*). A volte tali flussi gravitativi si presentano come dominanti rispetto alla sedimentazione pelagica di *background*; tali formazioni spiccatamente detritiche sono distinte anche nella cartografia ufficiale dalle classiche unità pelagiche, enfatizzando il ruolo litogenetico di suddetti risedimenti.

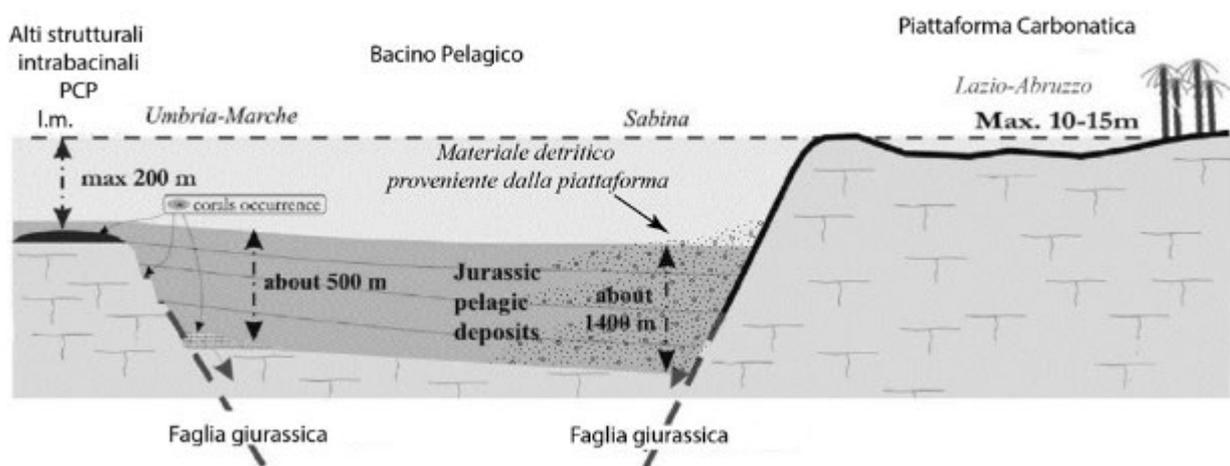


Fig. 2.3: Rappresentazione schematica dei rapporti stratigrafici e tettonici tra il dominio Umbro-Marchigiano-Sabino e il dominio di piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese nel Giurassico (da Carminati et al., 2013, modificato).

Le unità carbonatiche del Cretacico Superiore-Miocene medio caratterizzanti i quadranti più orientali dell'area in analisi, e afferibili alla successione Laziale-Abruzzese, rappresentano l'unità tettonica al *footwall* del lineamento Olevano-Antrodoco e si trovano, attualmente, anche al letto delle faglie estensionali che bordano verso SW la dorsale dei M. Simbruini. Un relitto di questi depositi di piattaforma si ha al tetto delle suddette faglie, e caratterizza il colle sul quale sorge l'abitato di Marano Equo. Ad eccezione di questo "scoglio" carbonatico, depositi terrigeni di avanfossa si trovano interposti tra le faglie bordiere dei M. Simbruini (i.e. sui blocchi di tetto) e la Linea Olevano-Antrodoco (i.e. al *footwall*). Questi depositi sono riferibili al Complesso torbido altomiocenico Laziale-Abruzzese, e sono costituiti essenzialmente da arenarie alternate a subordinati livelli pelitici.

I depositi continentali e vulcanoclastici quaternari sono molto diffusi nell'area in esame. Nel settore orientale, si hanno principalmente alluvioni di fondovalle del Fiume Aniene e dei principali tributari, così come detrito di versante. Nella porzione centrale (tra Mandela e Vicovaro) affiorano importanti spessori di travertini (fino a circa 70 m di spessore - Sintema di Vicovaro) poggianti in *unconformity* su una potente successione conglomeratica, testimonianza di un ciclo sedimentario legato a una morfologia molto diversa da quella attuale (Sintema di Mandela).

Infine, nell'area occidentale (tra Vicovaro e Tivoli) i depositi quaternari affioranti sono prevalentemente costituiti da rocce vulcanoclastiche, correlabili con le principali eruzioni del Vulcano Laziale (Chiarabba & Giordano, 1990; Giordano & Chiarabba, 1991).

2.1 Assetto geologico di dettaglio

Nel presente capitolo vengono riportate le descrizioni litologiche delle unità litostratigrafiche affioranti e cartografate ai fini della ricostruzione geologica dell'area relativa alla *Prima Fase Funzionale*.

Le unità litostratigrafiche affioranti nell'area di studio comprendono depositi pre-orogenici, sin-orogenici e post-orogenici (Figg. 2.4 e 2.5). Per quel che concerne il *bedrock* pre-orogenico, le unità litostratigrafiche verranno suddivise a seconda dei domini paleogeografici. In particolare, verrà distinta la successione del Dominio Sabino (i.e. dominio di transizione a quello pelagico Umbro-Marchigiano), e la successione di piattaforma carbonatica del Dominio Laziale-Abruzzese. I depositi riferiti a queste successioni si sono depositi in ambiente marino, in un intervallo di tempo compreso tra il Giurassico e il Miocene "inferiore". Data l'omogeneizzazione dei contesti deposizionali e, di conseguenza, dei depositi nel Miocene, questi ultimi verranno descritti nella "Successione carbonatica miocenica" per quel che riguarda le facies di rampa carbonatica langhiano-serravalliana, e "Successione terrigena miocenica" per i depositi sinorogenici di avanfossa legati alla strutturazione della catena appenninica nel Miocene superiore. I depositi post-orogenici di ambiente continentale verranno raggruppati nel "Supersintema Tiburtino", mentre quelli vulcanoclastici nelle "Unità Vulcaniche". Infine, i depositi ubiquitari tardo pleistocenici-olocenici verranno trattati singolarmente.

Per il riconoscimento delle varie unità sono stati applicati i classici criteri di rilevamento geologico di campagna (litologia, litologie accessorie, caratteri biostratigrafici).

I nomi delle unità litostratigrafiche utilizzati sono quelli riportati anche nei fogli CARG n. 366 "Palombara Sabina", 367 "Tagliacozzo", 375 "Tivoli" e 376 "Subiaco".

Per quanto riguarda le unità post-orogeniche è stato utilizzato il criterio di classificazione riportato nei fogli CARG n. 366 "Palombara Sabina" e 375 "Tivoli".

Nell'area investigata non affiorano formazioni più antiche del Pliensbachiano.

**Schema dei rapporti stratigrafici
 delle unità meso-cenozoiche affioranti nell'area studiata**

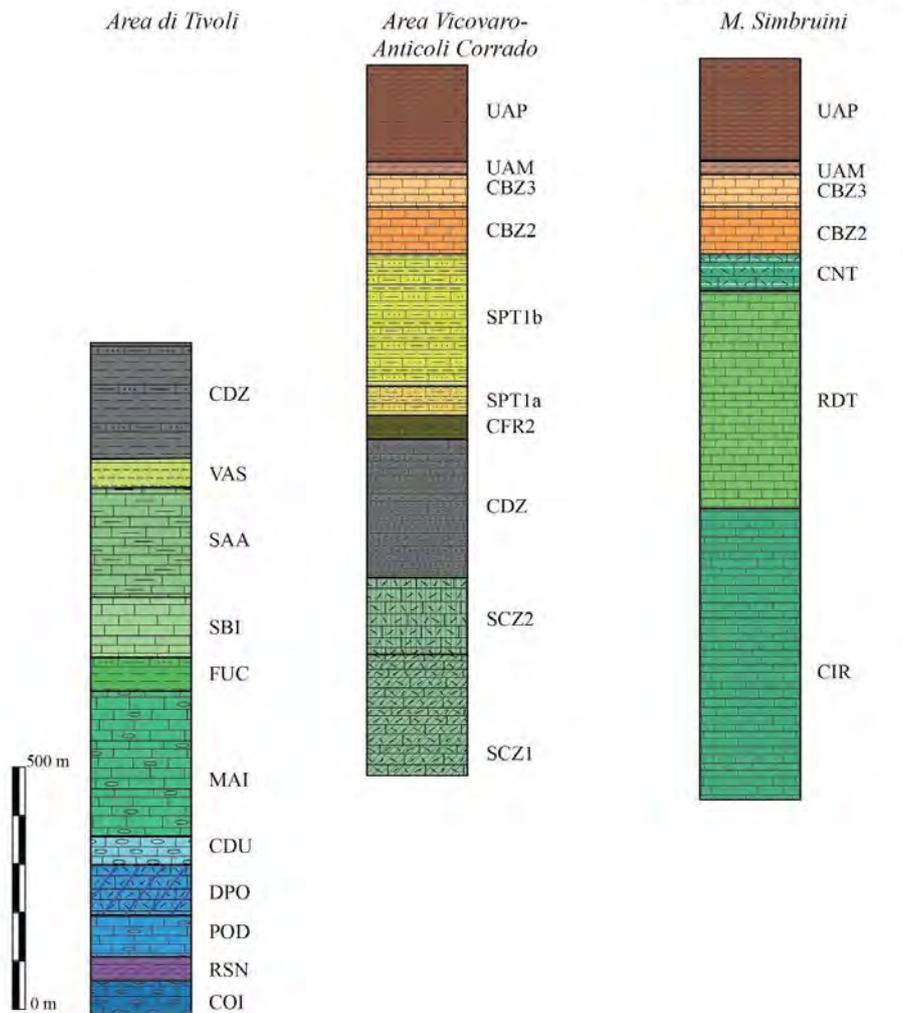


Fig. 2.4: Colonna stratigrafica e schema dei rapporti stratigrafici delle unità pre- e sin-orogeniche affioranti nell'area studiata.

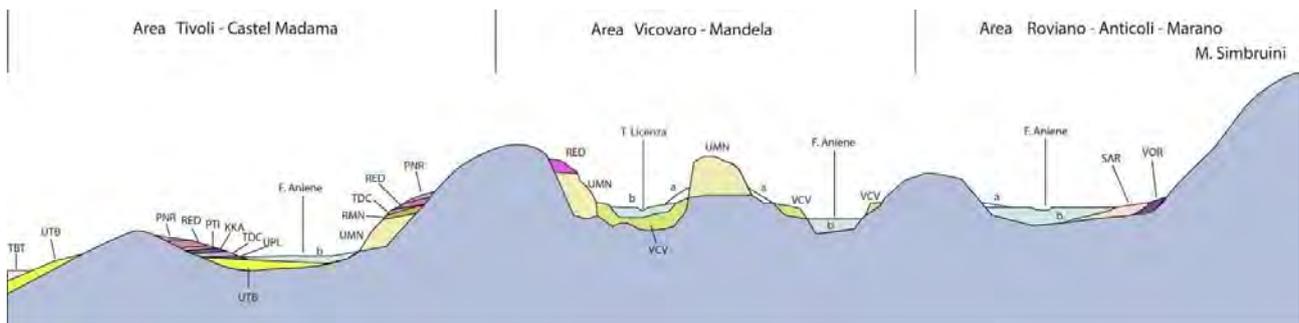


Fig. 2.5: Schema dei rapporti stratigrafici delle unità post-orogeniche quaternarie affioranti nell'area studiata (non in scala).

2.1.1 *Depositi pre-orogenici – Dominio Sabino*

Scaglia Detritica (SCZ)

Nelle porzioni più orientali (in coordinate attuali) del Dominio Sabino, per via dei cospicui apporti sedimentari dalla vicina Piattaforma Laziale Abruzzese, la componente detritica intercalata ai livelli pelagici delle formazioni pelagiche della Scaglia Rossa, della Scaglia Bianca e della Scaglia Variegata diventa dominante, al punto che si rende necessaria l'istituzione di un'apposita unità stratigrafica detritica che sostituisce totalmente in eteropia laterale le suddette formazioni.

SCZ1 - Scaglia Detritica - membro calcarenitico-calciruditico (Cenomaniano – Maastrichtiano)

L'unità si presenta con strati calcarenitici e calciruditici pluridecimetrici di colore bianco-grigiastro o avana, con subordinate bancate di spessore metrico, contenenti essenzialmente un biodetrito indeterminabile, bioclasti di organismi di piattaforma carbonatica (rudiste, echinodermi, microforaminiferi e macroforaminiferi bentonici tipo *Orbitoides* sp.) e litoclasti. La selce è meno frequente rispetto alla Scaglia Rossa tipica, e di colore bianco o grigio. L'unità affiora nell'unità tettonica 4, nei dintorni dell'abitato di Cineto Romano, nel settore centrale dell'area investigata. Il contenuto fossilifero dei livelli pelagici è del tutto paragonabile a quello della Scaglia Bianca e della porzione cretacea della Scaglia Rossa. Lo spessore è di circa 250 metri.

SCZ2 - Scaglia Detritica - membro calciruditico-calcarenitico (Daniano - Priaboniano)

Alternanze di calcari marnosi e marne calcaree di colore rosato, avana chiaro e nocciola, in strati da decimetrici a pluridecimetrici, con lenti di selce grigia e rossastra. Sono presenti frequenti intercalazioni calciruditiche (Fig. 2.6), a volte prevalenti rispetto alle altre litofacies, bianche e avana, con echinodermi, macroforaminiferi (nummullitidi ed alveolinidi), briozoi, bivalvi e litoclasti di piattaforma carbonatica. Nella porzione superiore sono presenti sottili livelli marnoso-argillosi. La scarsità dei livelli pelagici riduce di molto la risoluzione biostratigrafica. I rari livelli pelagici presentano un

contenuto fossilifero del tutto paragonabile a quello della porzione cenozoica della Scaglia Rossa e della Scaglia Variegata. L'unità affiora nell'unità tettonica 4 tra Mandela e Cineto Romano. Lo spessore può raggiungere i 150 m. La Formazione della Scaglia Detritica (SCZ2) è stata rinvenuta nei sondaggi geognostici S14 e S14bis a profondità comprese tra 30 metri da piano campagna e il fondo foro.



Fig. 2.6: bancate calciruditiche nella SCZ2 affiorante lungo la strada provinciale per Cineto Romano.

CDZ - Scaglia Cinerea detritica (Priaboniano p.p. - Rupeliano p.p.)

La formazione della Scaglia Cinerea nell'area investigata si presenta sempre in una facies dominata dalla componente detritica intercalata ai livelli pelagici. L'unità è costituita da intervalli carbonatici detritici, organizzati in strati pluridecimetrici e bancate lenticolari, contenenti abbondanti macroforaminiferi e litoclasti. A questi si intercalano calcari marnosi e marne argillose di colore grigio-verdastro, giallastro e avana (Fig.

2.7). La porzione marnosa è nettamente subordinata a quella calcarenitica/calciruditica, tanto che la formazione ha un aspetto francamente calcareo (Fig. 2.8). L'unità affiora nelle unità tettoniche 3 e 4, ai piedi della dorsale su cui sorge l'abitato di San Polo dei Cavalieri, e in affioramenti discontinui lungo la valle dell'Aniene tra Castel Madama e Roviano, in particolare nell'area di Cineto Romano. Lo spessore della formazione supera i 200 metri. La Formazione della Scaglia Detritica è stata rinvenuta nel sondaggio geognostico S9 a profondità comprese tra 48 e 55 metri da piano campagna.



Fig. 2.7: Intervallo marnoso della CDZ, affiorante in località "Il Poggio", in sinistra idrografica dell'Aniene.



Fig. 2.8: CDZ affiorante lungo la strada per Cineto Romano.

CFR - Calcareniti a Macroforaminiferi (Rupeliano p.p.- Aquitaniano p.p.)

Nell'area investigata affiora solo il membro superiore della formazione, le Calcareniti a miogypsine e lepidocycline (CFR2). Si tratta di calcareniti di colore avana e nocciola, organizzate in strati da decimetrici a metrici, con grossi noduli di selce biancastra e marrone, particolarmente abbondanti nella porzione inferiore della formazione; nella porzione superiore sono presenti calcareniti nocciola con punti di ossidazione arancioni. Il contenuto fossilifero è caratterizzato da abbondanti macroforaminiferi, tra cui lepidocycline, amphistegine, miogypsine (Fig. 2.9) e nella parte altra abbondanti spicole di spugna. Sono presenti intercalazioni di calcari marnosi con foraminiferi planctonici, marne calcaree, marne e livelli argillosi, di colore verde, per lo più in strati sottili e medi. L'unità affiora nell'unità tettonica 4, tra Mandela e Roviano. Lo spessore raggiunge i 70 m.



Fig. 2.9: Brecciola a macroforaminiferi in CFR2 affiorante nei pressi di Mandela.

Unità Spongolitica (SPT)

Nell'ambito di questa unità, nell'area investigata affiorano soltanto le due litofacies del Membro di Guadagnolo, quella calcarenitica e quella marnosa.

SPT1a - Membro di Guadagnolo, litofacies calcarenitica (Aquitano p.p. – Burdigaliano p.p.)

Alternanze di calcareniti fini di colore avana con tracce di ossidazione, marne e marne calcaree grigie e avana chiaro, organizzate in strati da decimetrici a pluri-decimetrici. La parte bassa dell'unità è caratterizzata da calcari detritici a macroforaminiferi (Fig. 2.10), e da marne calcaree con foraminiferi planctonici. La parte alta è caratterizzata da un progressivo aumento degli interstrati marnosi e da una maggiore percentuale di

matrice nelle calcareniti, così come un incremento della silicizzazione testimoniato dai frequenti noduli e dalle liste di selce nera. Il contenuto fossilifero è costituito da abbondanti spicole di spugna e associazioni a foraminiferi bentonici. L'unità affiora nell'unità tettonica 4, a nord dell'abitato di Mandela e nei dintorni di Cineto Romano. Lo spessore raggiunge i 60 m.



Fig. 2.10: calcari detritici in SPT1a, affioranti nei pressi delle strutture di proprietà di Acea di Cineto Romano

SPT1b - Membro di Guadagnolo, litofacies marnosa (Burdigaliano p.p. - Langhiano p.p.).

Alternanze di marne, marne calcaree e marne argillose a luoghi più calcaree, di colore avana chiaro, e marrone, in strati pluri-decimetrici e bancate metriche (Fig. 2.11). Sono presenti intercalazioni calcarenitiche costituite da detrito bioclastico caratterizzato da

associazioni ad abbondanti foraminiferi bentonici. Nella porzione superiore questi livelli calcarenitici, spesso caratterizzati da una tipica fratturazione a losanga, si rinvencono abbondanti frammenti di echinodermi, bivalvi e briozoi, e la loro frequenza aumenta, fino a diventare una caratteristica dominante dell'unità. In questa porzione è presente anche selce grigia in grossi noduli.

Oltre al citato detrito bioclastico, il contenuto fossilifero degli intervalli marnosi e marnoso calcarei dell'unità è dominato da spicole di spugna e foraminiferi planctonici. L'unità affiora estesamente nell'area investigata, nell'unità tettonica 4, e in particolare costituisce la stragrande maggioranza degli affioramenti in sinistra idrografica del Fiume Aniene, tra lo sbarramento di Roviano e Castel Madama. Lo spessore di questa litofacies è di circa 500 - 600 metri. Il Membro di Guadagnolo (SPT1b) è stata rinvenuto nelle parti più profonde dei sondaggi geognostici S27 e S55 (a partire da circa 60 metri di profondità) e lungo l'intera verticale del sondaggio S32.



Fig. 2.11: Bancata marnosa di spessore metrico in SPT1b, passante verso l'alto a un livello più competente, costituito da calcareniti con spicole di spugna. Strada provinciale per Saracinesco.

2.1.2 Depositi pre-orogenici – Dominio di Piattaforma carbonatica laziale abruzzese

La porzione orientale dell'area studiata comprende le pendici della dorsale dei Monti Simbruini e la collina su cui sorge Marano Equo, ed è caratterizzata dall'affioramento di una potente successione calcarea di piattaforma carbonatica, riferibile al Cretacico del Dominio Laziale Abruzzese.

CIR - Calcari ciclotemici a Requieridi (Aptiano *p.p.* – Cenomaniano)

Calcari a tessitura molto varia, da *wackestones* a *packstones* molto grossolani, in strati da decimetrici a pluri-decimetrici, di colore grigio-avana, caratterizzati dalla frequente presenza di intervalli ricchi di rudiste requieridi. Alcuni livelli si presentano molto dolomitizzati, e sono presenti livelli calcarei arrossati. Gli intervalli a granulometria più fine sono caratterizzati da associazioni fossilifere a foraminiferi bentonici molto abbondanti, ostracodi e frammenti di bivalvi.

L'unità affiora nell'unità tettonica 5, nella porzione orientale dell'area investigata, lungo i versanti dei Monti Simbruini. Lo spessore è di circa 600 m

RDT - Calcari a Radiolitidi (Turoniano – Campaniano *p.p.*)

Packstones e *wackestones* in strati da decimetrici a metrici, con geometria prevalentemente tabulare; a luoghi affiorano corpi chiaramente lentiformi costituiti da accumuli di abbondante detrito di rudiste o da rudiste in posizione fisiologica disposte in *clusters* o *bouquets* (principalmente hippuritidi e radiolitidi). La porzione inferiore è caratterizzata da litofacies micritiche con faune oligotipiche riferibili al Turoniano.

Il contenuto fossilifero delle porzioni media e superiore è caratterizzato da abbondanti associazioni a foraminiferi bentonici, alghe, ostracodi e frammenti di bivalvi. L'unità è organizzata in cicli peritidali. L'unità affiora nell'unità tettonica 5, nella porzione orientale dell'area investigata, lungo i versanti dei Monti Simbruini. Lo spessore è maggiore di 450 m, e può raggiungere i 600 m

CTN - Calcare Saccaroide a Orbitoidi (Campaniano *p.p.* – Maastrichtiano *p.p.*)

Packstones estremamente ricristallizzati, totalmente privi di strutture sedimentarie, massivi o organizzati in strati di spessore metrico (Fig. 2.12). Il contenuto fossilifero è caratterizzato dalla presenza di macroforaminiferi del genere *Orbitoides* e da rudiste radiolitidi del genere *Sabinia* (Fabbi et al., 2018). L'unità affiora nell'unità tettonica 5, nella porzione orientale dell'area investigata, lungo i versanti dei Monti Simbruini e nei dintorni di Marano Equo. Lo spessore è di circa 70 m



Fig. 2.12: CTN dall'aspetto molto massivo, affiorante lungo la strada provinciale per Marano Equo.

2.1.3 Depositi pre-orogenici – Successione carbonatica miocenica

A partire dal Miocene medio la distinzione in domini paleogeografici dell'area investigata perde di significato, in quanto entrambi i domini sono caratterizzati dalla sedimentazione della formazione dei Calcari a Briozoi e Litotamni (CBZ), suddivisa in due membri.

CBZ2 - Calcareniti a punti rossi (Langhiano p.p.)

Calcareniti fini, a luoghi bioclastiche, di colore avana e nocciola, con tracce puntiformi di ossidazione; sono disposte prevalentemente in banchi (Fig. 2.13), e caratterizzate da strutture a losanga. Localmente si rinvencono intercalazioni di marne. Il contenuto fossilifero è costituito da frammenti di echinidi e pettinidi, da ditrupe, da rari foraminiferi planctonici e bentonici. Il limite inferiore di questo membro è caratterizzato dall'aumento della componente pelitica, che segna il passaggio alla sottostante litofacies marnosa del Membro di Guadagnolo (SPT1b). Questo limite è ben visibile a sud della Stazione di Mandela Scalo, in una cava abbandonata lungo la bassa valle del Torrente Fiumicino (Fig. 2.14). L'unità affiora nei dintorni di Roviano, sul Monte Licino e lungo la bassa valle del Torrente Fiumicino. Lo spessore è di circa 90-100 m.



Fig. 2.13: CBZ2 con stratificazione in bancate, affiorante lungo la strada provinciale per Sambuci, nella bassa valle del torrente Fiumicino.



Fig. 2.14: CBZ2 con lenti marnose, indicanti il passaggio alla sottostante unità SPT1b. cava abbandonata nei pressi del bivio per Saracinesco, nella bassa valle del torrente Fiumicino.

CBZ3 - Calcareniti a briozoi (Serravalliano)

Calcareniti bioclastiche di colore avana e bianco, a grana media e grossolana, in strati medi e spessi, a luoghi in bancate (Fig. 2.15). Nella parte superiore dell'unità sono spesso frequenti strutture a losanga. A tratti sono osservabili strutture sedimentarie quali laminazioni piano-parallele ed ondulate. Nelle litofacies carbonatiche, sono presenti, oltre a colonie di briozoi e litotamni, associazioni di foraminiferi bentonici di piccole dimensioni e frammenti di lamellibranchi. A luoghi, tra una bancata e l'altra si osservano sottili intercalazioni di orizzonti calcareo-marnosi finemente detritici color avana e senape, che aumentano di frequenza verso l'alto. Questi orizzonti sono, a luoghi, ricchi in glauconite, bioturbazioni (*Thalassinoides*) e foraminiferi planctonici. Il limite inferiore è marcato da un brusco aumento dello spessore degli strati carbonatici e dalla scomparsa, quasi totale, della frazione pelitica. Questa unità affiora estesamente a Roviano, Rovianello, e tra Anticoli Corrado e Saracinesco. Il limite superiore è caratterizzato da un *hardground* glauconitico-fosfatico, che segna il passaggio alla

soprastante Unità argilloso-marnosa (Fig. 2.16). Lo spessore è di circa 70 m. La Formazione dei Calcari a Briozoi (CBZ3) è stata rinvenuta, in condizioni di forte tettonizzazione, nel sondaggio geognostico S6 a profondità comprese tra 32 metri da piano campagna e fondo foro.



Fig. 2.15: CBZ3 in grosse bancate affioranti in località Santianni (Anticoli Corrado).



Fig. 2.16: Superficie fosfaticata che marca il tetto dei CBZ3, al passaggio con l'UAM. Località Santianni (Anticoli Corrado).

2.1.4 Depositi sin-orogenici – Successione terrigena miocenica

Nella successione terrigena miocenica sono raggruppati i litotipi sin-orogenici, caratterizzati da facies emipelagiche che evolvono verso l'alto a facies torbiditiche di avanfossa, marcate dalla comparsa della componente silicoclastica.

UAM - Unità argilloso-marnosa - Marne a Orbulina (Tortoniano p.p.)

Argille e marne argillose di colore grigio, ricche in foraminiferi planctonici (tra cui *Orbulina* spp., Marne a *Orbulina Auct.*). In località Santianni (Anticoli Corrado) questa unità segue stratigraficamente le facies del CBZ3, come marcato da un'intensa mineralizzazione del *bedrock* carbonatico (Fig. 2.16). Altri affioramenti si hanno in località Spinetta (W di Anticoli Corrado), e in prossimità della Stazione di Mandela Scalo. Il passaggio all'unità sovrastante (UAP) è marcata dalla comparsa delle intercalazioni torbiditiche silicoclastiche. Lo spessore è variabile, e raggiunge un massimo di 60 m.

UAP - Unità Arenaceo-Pelitica (Tortoniano superiore) - (cfr. Complesso torbiditico altomiocenico laziale-abruzzese)

Si tratta di arenarie grossolane giallastre e grigie, più o meno cementate, con rari interstrati argilloso marnosi (Fig. 2.17); a luoghi si rinvencono inclusi pelitici (*soft pebbles*). L'Unità arenaceo-pelitica è spesso coperta dalle unità ubiquitarie dei depositi post-orogenesi. L'unità affiora estesamente tra Anticoli Corrado e Roviano. Lo spessore affiorante è di circa 200 metri. L'Unità Arenaceo-Pelitica (UAP) è stata rinvenuta nel sondaggio geognostico S4 a profondità comprese tra 25 metri da piano campagna e fondo foro.



Fig. 2.17: Affioramento dell'UAP lungo la strada "Sublacense", in prossimità di Agosta.

2.1.5 *Depositi post-orogenici – Unità sedimentarie post-orogeniche continentali*

Supersintema Tiburtino

I depositi appartenenti a questo supersintema affiorano lungo l'attuale valle del Fiume Aniene, e si tratta di depositi legati a sistemi deposizionali fluviali di diversa età, con drenaggio verso il Fiume Tevere. Questo supersintema comprende anche depositi connessi al drenaggio del paleo-Aniene. I depositi del Supersintema Tiburtino poggiano in forte discordanza angolare sul substrato deformato pre-pliocenico. Il supersintema comprende tre diversi sistemi: (1) Sintema di Mandela (UMN); (2) Sintema di Colle Ramanna (RNM); (3) Sintema di Vicovaro (VCV). Il limite superiore del supersintema corrisponde alla superficie topografica attuale o al passaggio discordante con le coperture ubiquitarie oloceniche.

UMN - Sintema di Mandela (Pleistocene inferiore)

Conglomerati granosostenuti con ciottoli poligenici, prevalentemente calcarei relativi alle successioni carbonatiche locali e, secondariamente, ciottoli marnosi ed arenacei (Fig. 2.18). Il deposito è generalmente eterometrico e con grado di arrotondamento dei clasti elevato (Fig. 2.18). La matrice è principalmente sabbiosa, con contenuto variabile, mentre il cemento, di natura carbonatica, conferisce ai conglomerati un aspetto massivo (Fig. 2.19). Dato l'elevato grado di cementazione, i depositi clastici afferibili all'UMN presentano evidenti tracce di carsificazione (Fig. 2.19) come dotti carsici, *karren* e piccole strutture da collasso. La caratteristica cementazione è tuttavia possibilmente soggetta a variazioni sia areali che lungo la verticale stratigrafica, mostrando sporadici orizzonti a granulometria più fine (S27: sabbie medio-fini, debolmente limoso-argillose) da debolmente addensati a sciolti. I depositi del Sintema di Mandela affiorano solo in riva destra rispetto all'attuale decorso del Fiume Aniene. L'UMN affiora, con buone esposizioni, nel centro abitato di Mandela e nell'area compresa tra il bivio per Santa Balbina, Colle Sacco Muro e Colle Ottati. Con particolare riferimento alla zona di Vicovaro-Mandela, quando la Formazione UMN è presente al di sotto dei Travertini VCV, il passaggio verso l'alto è caratterizzato da un graduale arricchimento in Travertino. Lo spessore raggiunge i 150 m. Carote di materiale della suddetta Formazione sono state rinvenute anche nella zona di Santa Balbina nei sondaggi S39, S41 e S60 a partire da 30 metri di profondità da piano campagna in poi.



Fig. 2.18: Conglomerato poligenico con clasti prevalentemente calcarei, molto arrotondati, affiorante a Colle Ottati.



Fig. 2.19: Aspetto massivo ma carsificato dei conglomerati dell'UMN affioranti a Colle Ottati.

SAR - Sabbie di Arsoli (Pleistocene superiore)

Sabbie gialle con lenti diatomitiche e travertinose concrezionali, di origine lacustre. Affiorano limitatamente al settore settentrionale di Mola di Regno, con spessore di pochi metri.

VCV - Sintema di Vicovaro (Pleistocene superiore-Olocene)

Il Sintema di Vicovaro è costituito prevalentemente da depositi di *calcareous tufa* (Carrara et al., 2006), con intercalazioni conglomeratico-sabbiose, a matrice prevalentemente travertinosa, con frustoli vegetali, e più raramente sabbiosa. Nella zona di Mandela-Vicovaro il processo di precipitazione del carbonato di calcio è stato probabilmente innescato da una struttura morfotettonica, situata appena a sud di Vicovaro, dove è stato riconosciuto un corpo di sbarramento fluviale. Questo potrebbe essersi formato vicino a Vicovaro, dove il dislocamento delle vulcaniti del Pleistocene medio, sovrapposto da sedimenti alluvionali più giovani e grossolani ha prodotto una discontinuità morfologica nel letto del fiume. In seguito, durante fasi non deposizionali e/o fortemente erosive, il deposito è stato profondamente tagliato e sezionato dal fiume Aniene e dai suoi affluenti di destra. Inoltre, durante il processo di taglio, il fiume ha lasciato diverse nicchie di depositi alluvionali, generalmente costituite da ghiaie, conglomerati e sabbie stratificati orizzontalmente e di alcuni metri spessore, racchiusi nei tufi calcarei (Carrara et al., 2006).

I depositi carbonatici continentali (*calcareous tufa*) sono vacuolari, porosi e a volte poco litoidi, con frequenti frustoli vegetali e ricristallizzazioni secondarie di calcite alabastrina. Le rupi di Vicovaro e del Convento di S. Cosimato sono costituite da travertini massivi, e sono interessati da evidenti fenomeni carsici quali sgrottamenti e dotti carsici ricoperti da incrostazioni laminate di calcite sparsa e speleotemi, anche di dimensioni notevoli. (Fig. 2.20, Fig. 2.21). Questi depositi poggiano in maniera concordante sui conglomerati e sabbie del Sintema di Mandela (UMN) e discordante sulla litofacies marnosa del Membro di Guadagnolo (SPT1b). Altri affioramenti si hanno in prossimità della stazione di Mandela Scalo, così come circa 1 km a est di Mandela. Lo spessore dell'unità è variabile, con valori massimi di almeno di 60 m.



Fig. 2.20: aspetto vacuolare del travertino fitotermale affiorante nei pressi di San Cosimato.



Fig. 2.21: La Rupe di San Cosimato, costituita da travertini del VCV.

2.1.6 *Depositi post-orogenici – Depositi ubiquitari*

b2 - Coltre eluvio-colluviale (Olocene)

Coltri dovute ad alterazione chimico-fisica della roccia madre sottostante. Depositi a clasti monogenici, con prevalenza di clasti di selce, immersi in matrici di colore rosso acceso. Sono generalmente situati sulle cime dei rilievi o in zone depresse non prossime a versanti.

bv - Depositi alluvionali /colluviali che rimaneggiano parzialmente le vulcaniti (Olocene)

Depositi di origine alluvionale e colluviale costituiti da ghiaie calcaree, sabbie, limi e argille, con inclusi minerali e piccoli litici vulcanici. Questi depositi, difficilmente individuabili dal rilevamento classico di campagna, sono stati largamente rinvenuti nei sondaggi geognostici effettuati nella zona di Santa Balbina (S39, S41, S60 e S60bis). Sebbene risulti difficile delimitare arealmente la presenza di tali depositi per via della vegetazione e della parziale inaccessibilità ai siti, si ritiene che la distribuzione areale sia potenzialmente connessa con le caratteristiche morfologiche attuali e passate dell'area: risulta infatti che la presenza di questi litotipi è particolarmente evidente nei sondaggi effettuati in prossimità dell'attuale impluvio delle piccole valli in destra idrografica dell'Aniene. Queste morfologie vallive sarebbero quindi state interessate da processi fluviali, e più recentemente colluviali, connessi al parziale smantellamento delle Formazioni vulcaniche, che oggi sono rappresentate con le loro caratteristiche litologiche originali solo in corrispondenza degli alti morfologici ed al di sotto di essi. L'erosione delle vulcaniti avveniva in maniera contestuale allo smantellamento della limitrofa dorsale carbonatica, che ha garantito nel tempo un continuo apporto di sedimento calcareo. I dati di sondaggio presenti mostrano depositi con spessori di almeno 30 m che poggiano alla base sui conglomerati UMN del Sistema di Mandela.

b - Depositi alluvionali / fluvio-lacustri (Olocene – Pleistocene sup.; Pleist. Plio.)

I depositi alluvionali (fluviali e di conoide) sono costituiti da alternanze di varie litologie determinate dal complesso paleo-morfologia dell'area e dai diversi ambienti sedimentari succedutisi nel corso del tempo. I depositi sono generalmente costituiti da ghiaie eterometriche, con clasti da sub-arrotondati a sub angolosi e da centimetrici a decimetrici, sabbie e limi, nei quali si intercalano possibili livelli di sabbie travertinose, e spessi strati o lenti di argille contenenti talora clasti calcarei e marnosi. Gli elementi clastici, contraddistinti da una notevole eterogeneità, sono riferibili a litotipi calcarei appartenenti alla successione della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese ed alla successione di transizione umbro-sabina; litotipi arenacei delle successioni torbiditiche silicoclastiche alto-mioceniche sono perlopiù assenti o estremamente rari. Le coperture alluvionali oloceniche sono morfologicamente incassate nelle unità continentali più antiche e nel substrato carbonatico. Questi depositi che caratterizzano quindi le depressioni vallive sono principalmente associati al decorso dei fiumi Aniene e Licenza e la stratigrafia tipica varia da luogo a luogo a causa delle non uniformi modalità di deposizione. Il limite superiore è riferibile alla piana alluvionale; il limite inferiore, di natura erosiva, corrisponde alla superficie di contatto sulle unità continentali più antiche e sul substrato. Le informazioni provenienti dalla campagna geognostica suggeriscono invece che la geometria trasversale delle valli, e quindi il contatto laterale con le adiacenti dorsali montuose, può avvenire con superfici di incisione a pendenza molto elevata, determinando la presenza di notevoli spessori di depositi alluvionali anche nelle zone di bordo valle. In altri casi gli spessori massimi vengono invece raggiunti secondo superfici più a basso angolo, testimoniando un possibile decentramento dell'antico asse della valle rispetto all'attuale. La morfologia di questa antica valle epigenetica sembrerebbe caratterizzata da pareti quasi sub-verticali e sedimentazione alla base di potenti strati di argille, tuttavia, essendo questa struttura suturata al di sotto dei più recenti depositi alluvionali, risulta pressoché impossibile con le informazioni attuali determinare la sua posizione rispetto all'asse attuale del Fiume Aniene. Le indagini geofisiche (geoelettriche, microgravimetriche e sismiche a rifrazione e riflessione) unitamente ai dati di sondaggio, suggeriscono spessori massimi mediamente di 60m. Materiale riconducibile a tali depositi è stato rinvenuto nei sondaggi S1, S2, S3, S3bis, S4, S6, S8, S9, S12, S13, S14, S14bis.

a - Depositi di versante (Olocene)

Depositi detritici costituiti da clasti spigolosi, generalmente eterometrici e poligenici, a matrice sabbioso-argillosa, a tratti cementati e clinostratificati. Caratterizzano le aree pedemontane, con spessore modesto

h - Deposito antropico (Olocene)

Depositi eterogenei dovuti allo spostamento o ammassamento di materiale roccioso. Si hanno in prossimità del tiro a volo di Roviano, in località Santianni legati allo scavo della condotta idroelettrica di ACEA che convoglia le acque del Fiume Aniene da località "La Sbarra" alla centrale di Mandela, e in prossimità delle cave a sud di Cineto Romano. Lo spessore raggiunge i 30 m.

3. Assetto geologico strutturale di dettaglio dell'area

L'area investigata è costituita nel complesso da una sequenza di strutture plicative a vergenza orientale o nordorientale, la cui origine è da ricondurre all'azione di almeno due piani di sovrascorrimento principali. Tali strutture risultano successivamente dislocate da numerose faglie a cinematica estensionale o transtensiva. Ai lineamenti principali è associato un fitto pattern di strutture tettoniche secondarie che si sviluppano a scala minore.

Le strutture compressive principali dell'area sono (vedi Fig. 2.2): 1) il sovrascorrimento di M. Sterparo-M. Castelvecchio, le cui evidenze si hanno solo sul Colle Ripoli a sud di Tivoli; 2) il sovrascorrimento del T. Licenza-M. Elci-M. Tancia; 3) la linea Olevano-Antrodoco. I lineamenti estensionali più importanti si collocano : 1) nella zona di Mola di Regno, dove le faglie bordiere sepolte dei M. Simbruini, orientate approssimativamente N-S, generano un piccolo bacino intramontano; 2) il sistema di faglie dirette ad andamento meridiano di Santianni-Rovianello (a ovest di Anticoli Corrado-Roviano); 3) il sistema di faglie bordiere della valle del Fiume Aniene nel tratto da Mola di Regno a Cineto, orientato WNW-ESE; 4) il sistema di faglie sepolto orientato WSW-ENE, tra Vicovaro e Mandela.

3.1 Unità tettoniche

Le unità tettoniche, numerate e denominate come in Fig. 2.2, presenti all'interno dell'area interessata della *Prima Fase Funzionale* sono:

- **U4** Unità compresa tra il sovrascorrimento del T. Licenza-M. Elci-M. Tancia e la linea Olevano-Antrodoco;
- **U5** Unità al footwall della linea Olevano-Antrodoco (Dominio Laziale-Abruzzese).

3.1.1 Unità compresa tra il sovrascorrimento del Torrente Licenza-Monti Elci-Monte Tancia e la linea Olevano-AnTRODoco (U4)

Questa unità è caratterizzata da estesi affioramenti dei litotipi miocenici, soprattutto **SPT1b**, **CBZ2** e **CBZ3**. In particolare, **SPT1b** affiora estesamente sul versante della valle in sinistra idrografica del Fiume Aniene, da Castel Madama ad Anticoli Corrado. In destra idrografica del Fiume Aniene, invece, affiora un mosaico di unità stratigrafiche cretacio-mioceniche, separato da un fitto sistema di faglie variamente orientate (set principali ad andamento circa meridiano e WNW-ESE) e con modesti rigetti (Fig. 3.1.3.1). Questa unità tettonica è limitata inferiormente dal lineamento compressivo riferibile alla Linea Olevano Antrodoco, spettacolarmente affiorante in località "Santianni" (Fig. 3.1.3.2), e risulta dislocato da un complesso network di faglie dirette post-orogeniche. Il sistema di faglie dirette di importanza maggiore corre con orientamento circa E-W da Mandela (poco a N dell'abitato) allo sbarramento di Roviano, bordando di fatto il versante destro della valle dell'Aniene (Fig. 3.1.3.3). Questo set di elementi tettonici è verosimilmente responsabile della disomogeneità di affioramenti tra i due versanti della valle.

Altro elemento tettonico molto importante è il sistema di faglie coniugate orientate circa N-S affiorante tra Santianni e Rovianello. Questo sistema presenta due lineamenti principali antitetici, ai quali si associa un complesso set di piani secondari, molto ben affioranti lungo la S.S. 5 "Tiburtina Valeria", all'altezza dello sbarramento di Roviano. La più orientale di queste faglie si segue abbastanza agevolmente da Santianni (versante sinistro della valle) a Rovianello (versante destro) e determina il ribassamento verso W dell'unità di tetto della linea Olevano Antrodoco (U4), qui rappresentata da affioramenti di **CBZ2** e **CBZ3**, sulle litofacies arenaceo-pelitiche di UAP, causando un older-on-younger estensionale (Fig. 3.1.3.4). La stessa linea Olevano-Antrodoco è dislocata da questo sistema di faglie e affiora solo al blocco di letto dello stesso. Il footwall della faglia Santianni-Rovianello è caratterizzato, quindi, da due unità tettoniche:

- la U4, che affiora al tetto della Linea Olevano Antrodoco con ampi affioramenti di **SPT1b**, **CBZ2** e **CBZ3**, in corrispondenza dell'abitato di Roviano, variamente ribassata da faglie estensionali, e del colle dove sorge l'abitato di Anticoli Corrado;

- la U5, che affiora nelle porzioni inferiori dei due versanti della valle dell'Aniene, caratterizzati da affioramenti di **UAP**.



Fig. 3.1.3.1: Piano di faglia estensionale S-immersa e orientato circa E-W, affiorante in località "Grotta Ferrata".

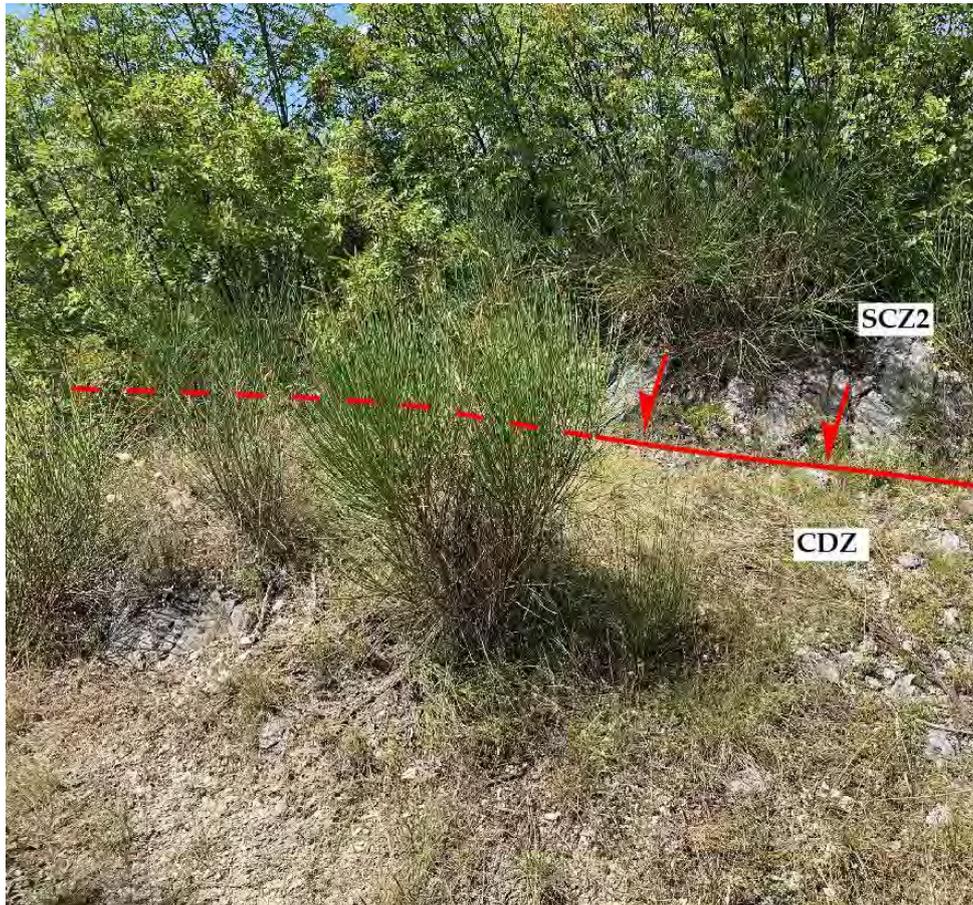


Fig. 3.1.3.2: Faglia diretta E-immersa, affiorante a Morge Rosse (S di Cineto Romano), che ribassa i CDZ su SCZ2.

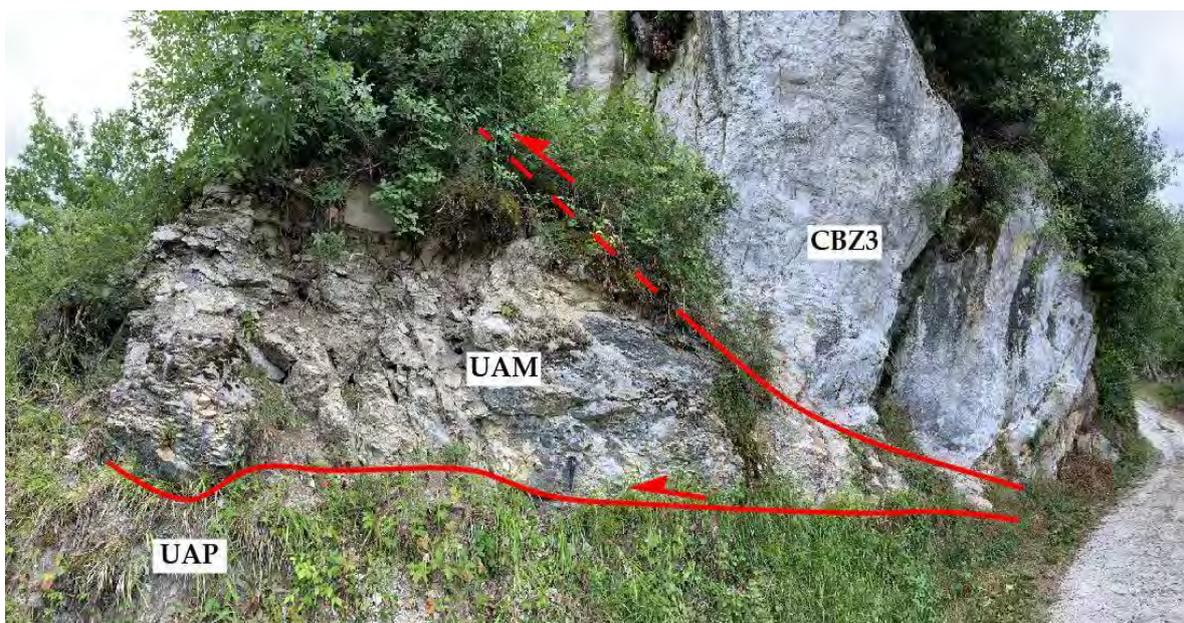


Fig. 3.1.3.3: Affioramento del thrust Olevano-Antrodoco in località "Santianni". I CBZ3 sovrascorrono sull'UAP mediante l'interposizione di una scaglia tettonica di UAM.

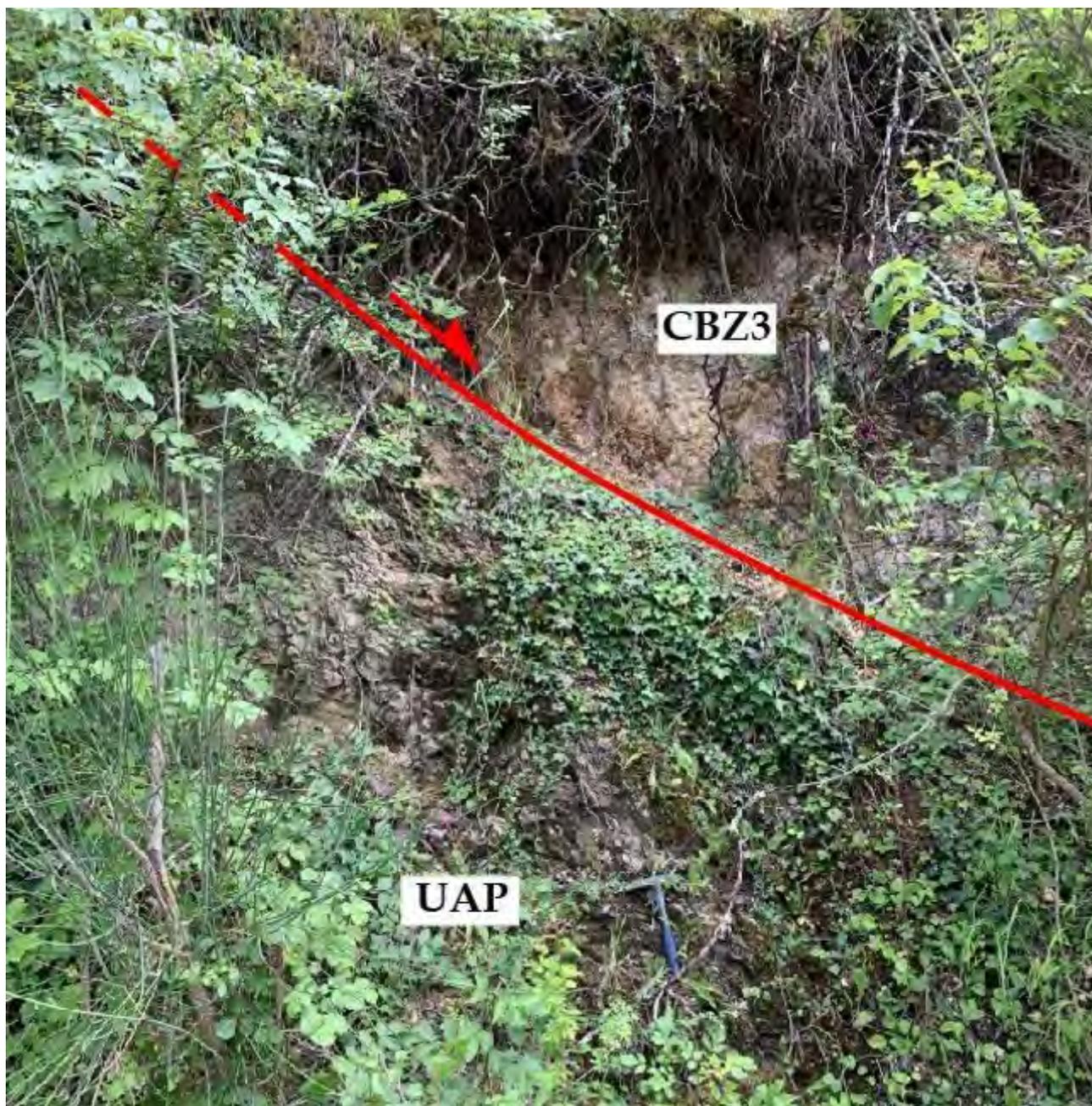


Fig. 3.1.3.4: Faglia diretta W-immersa Santianni-Rovianello, che ribassa il tetto del thrust Olevano-Antrodoco (rappresentato dai CBZ3) sul blocco di footwall dello stesso (rappresentato da UAP), causando un older-on-younger estensionale. Affioramento di San Nicola (Anticoli Corrado).

3.1.2 Unità di letto della linea Olevano-Antrdoco (U5)

Questa unità affiora estesamente a est della faglia Santianni-Rovianello, lungo il fondovalle e nella parte bassa dei due versanti della valle dell'Aniene. Essa può essere a sua volta divisa in due sottounità, in quanto la faglia bordiera dei Monti Simbruini, orientata circa N-S separa nettamente le unità del dominio di piattaforma carbonatica Laziale - Abruzzese, affioranti al margine orientale dell'area di studio dalle unità terrigene alto mioceniche affioranti lungo la valle tra Marano Equo e lo sbarramento di Roviano.

U5a - Al tetto della faglia bordiera dei Monti Simbruini

Questa sottounità è caratterizzata dall'affioramento delle unità silicoclastiche di avanfossa riferibili al complesso torbiditico alto miocenico laziale-abruzzese (UAP). Fatta eccezione per la parte inferiore del colle su cui sorge l'abitato di Roviano, costituito da una porzione dell'U4 ribassata tettonicamente da faglie dirette S-immersenti, questa unità affiora estesamente lungo i versanti inferiori della valle dell'Aniene tra lo sbarramento di Roviano e l'allineamento Fosso Scandrigliesi - Fosso Bagnatore, mentre è coperta dai depositi alluvionali dell'Aniene lungo il fondovalle. Il colle su cui sorge l'abitato di Marano Equo è costituito invece da calcari di piattaforma carbonatica alto-cretacici e miocenici (**CTN** e **CBZ2**), affioranti al tetto della faglia bordiera dei Monti Simbruini e ribassati di alcune centinaia di metri dalla stessa.

U5b - Al letto della faglia bordiera dei Monti Simbruini

La porzione più orientale dell'area studiata corrisponde alle propaggini dei Monti Simbruini, ed è caratterizzata dall'affioramento di unità cretatiche e mioceniche riferibili al dominio di piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese, variamente dislocate da faglie con orientazione principale E-W.

4. Caratterizzazione idrogeologica

4.1 Inquadramento idrogeologico regionale

Il contesto idrogeologico della media valle del Fiume Aniene risulta essere fortemente influenzato dall'assetto geologico-strutturale dell'area, a sua volta condizionato dalla presenza di elementi tettonici associati al thrust regionale ("Linea Olevano Antrodoco"), che interpone i flysch argilloso-arenacei tra le facies di piattaforma riconducibili al dominio Laziale Abruzzese e quelle di transizione della serie Umbro-Marchigiano-Sabina.

L'assetto idrogeologico che ne consegue determina la presenza di grandi idrostrutture carbonatiche meso-cenozoiche con circolazioni idriche regionali, i cui principali punti di recapito sono localizzati nel bacino del Fiume Aniene tra la zona di Agosta e Tivoli. Di conseguenza, il fondovalle alluvionale, con spessore e ampiezza variabile in funzione dell'assetto dei depositi pre-quadernari, rappresenta un ulteriore elemento idrogeologico significativo, ospitando localmente un acquifero multifalda in relazione diretta con il Fiume Aniene e a luoghi alimentato dalle limitrofe dorsali carbonatiche, anche per tramite delle strutture sepolte al di sotto dell'attuale valle fluviale.

Sul versante orientale i Monti Simbruini costituiscono, insieme agli Ernici, la grande Unità Idrogeologica dei Monti Simbruini e Ernici (riferimento C12 nella Carta Idrogeologica del Lazio alla scala 1: 250.000 - Capelli et alii, 2012) che si estende in direzione appenninica per circa 636 Km². I principali punti di recapito della circolazione di tale idrostruttura carbonatica, ubicati alla sua periferia lungo il contatto con i depositi altomiocenici o con i termini lacustri quadernari, sono rappresentati dal grande gruppo sorgivo di Agosta (5,4 m³/s), oltre alle sorgenti dell'Alto Aniene.

L'unità idrogeologica dei Monti Simbruini, costituita da litotipi carbonatici che presentano una marcata permeabilità secondaria che ha favorito lo sviluppo del carsismo sia superficiale che profondo, ospita una imponente falda di base la cui area di ricarica è rappresentata dalla dorsale appenninica.

Ad occidente della Linea Olevano-Antrodoco sono ubicate le idrostrutture dei Monti Sabini meridionali, dei Monti Cornicolani e Lucretili (riconducibili alla grande idrostruttura Sabina e ubicate in destra idrografica) e dei Monti Ruffi e Prenestini (in sinistra idrografica) (riferimenti C10 e C11 nella Carta Idrogeologica del Lazio alla scala 1: 250.000 - Capelli et alii, 2012). Nel loro insieme tali idrostrutture risultano

idraulicamente isolate, chiuse a NW da limi ed argille con intercalazioni di ghiaie e conglomerati diffusi nella valle del Tevere, a S dal complesso delle piroclastiti del vulcano Laziale mentre ad E i depositi terrigeni alto-miocenici le separano idraulicamente dalla già citata idrostruttura Simbruina. Il contatto con il flysch argilloso arenaceo è tettonico; il limite di permeabilità corre a quote più elevate del fondo valle del Fiume Aniene, generando numerose piccole emergenze allineate sul fronte orientale delle idrostrutture Sabina e dei Monti Ruffi.

Le più importanti emergenze sono, invece, ubicate sui margini settentrionale ed occidentale, dove sono presenti le sorgenti Le Capore (4,5 m³/s), il gruppo Capore - Sant'Angelo (0,3 m³/s), la sorgente Acquoria (0,75 m³/s) e le sorgenti delle Acque Albule (2 m³/s), oltre alle sorgenti lineari del Fiume Aniene nel tratto tra Anticoli Corrado e Tivoli (2,5 m³/s).

Tali unità idrogeologiche, pur essendo caratterizzate anch'esse da circolazioni idriche sotterranee che avvengono prevalentemente nelle successioni carbonatiche, presentano marcate differenze rispetto all'idrostruttura Simbruina. Infatti, le litologie affioranti nel settore orientale (Monti Sabini meridionali) appartengono prevalentemente alle facies di transizione, costituite da sequenze di marne, calcari marnosi e calcareniti più o meno fessurate ed interessate intensamente da un carsismo molto sviluppato nelle litologie carbonatiche. La disomogeneità litologica di tali depositi determina condizioni favorevoli per l'esistenza di falde sospese e discontinue. Nel settore occidentale (Monti Cornicolani e Lucretili) si ritrovano prevalentemente i termini calcarei e calcareo-marnosi mesozoici della successione Umbro-Marchigiano-Sabina, che ospitano falde profonde e generalmente molto produttive.

4.2 Caratterizzazione idrogeologica dell'area di indagine

L'assetto idrogeologico della Media Valle del Fiume Aniene che viene di seguito illustrato è la sintesi delle conoscenze bibliografiche in ambito stratigrafico, geologico-strutturale, idrogeologico ed idrochimico, integrate dai risultati delle indagini geognostiche e geofisiche condotte nell'area di studio.

4.2.1 Complessi idrogeologici

Le unità litostratigrafiche individuate nell'area di studio sono state raggruppate in base alle loro caratteristiche idrogeologiche in 16 complessi (Figura 4.1), individuati anche sulla base di quanto esposto nella cartografia idrogeologica (Capelli et alii, 2012; Boni et alii, 1988), per la loro capacità di assorbire ed immagazzinare le acque meteoriche, attitudine espressa in maniera qualitativa secondo i criteri di bassa, media ed alta potenzialità acquifera. Tale classificazione è stata basata ulteriormente sull'assetto crono-stratigrafico e deposizionale delle differenti unità ovvero, come esempio, formazioni prettamente calcaree sono state tra loro distinte anche in funzione della loro età e/o dell'ambiente deposizionale da cui provengono. Di seguito è riportata una breve descrizione dei complessi idrogeologici, con indicazione delle sigle CARG delle unità litostratigrafiche a cui fanno riferimento e la loro potenzialità acquifera. Complessi con alta potenzialità acquifera possono ospitare al loro interno falde acquifere mentre quelli con bassa potenzialità assumono il ruolo di aquicludi o aquitardi nei confronti della circolazione idrica sotterranea.

1		Complesso dei depositi antropici
2		Complesso dei depositi di versante
3		Complesso dei depositi di frana
4		Complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri
5		Complesso delle coltri eluvio-colluviali
6		Complesso delle vulcaniti
7		Complesso dei travertini e dei depositi travertinosi
8		Complesso dei conglomerati
9		Complesso dell'unità arenaceo-pelitica
10		Complesso delle Marne a Orbulina
11		Complesso delle calcareniti mioceniche
12		Complesso dell'unità spongolitica marnosa
13		Complesso delle calcareniti
14		Complesso delle Scaglie marnoso-argillose
15		Complesso delle Scaglie calcaree
16		Complesso dei calcari di piattaforma

Fig. 4.1: Complessi idrogeologici individuati nell'area di studio e relativa numerazione.

1 *Complesso dei depositi antropici* (h): Depositi eterogenei dovuti allo spostamento o ammassamento di materiale roccioso. Dato il loro limitato spessore (fino a 30 metri) e la loro eterogeneità, le potenzialità di tale complesso sono da riferirsi in funzione di quello su cui appoggiano.

2 *Complesso dei depositi di versante* (a): Depositi detritici costituiti da clasti spigolosi, generalmente eterometrici e poligenici, a matrice sabbioso-argillosa, a tratti cementati e clinostratificati. Con spessori modesti, si ritrovano ai piedi dei versanti e nelle zone depresse prossime ai rilievi. Potenzialità acquifera da bassa ad alta.

3 *Complesso dei depositi di frana* (a1): Detriti di frane e breccie di pendio. Spessori variabili. Potenzialità acquifera da bassa ad alta.

4 *Complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri* (b,bv): Depositi fluviali e di conoide alluvionale. Litologicamente molto eterogenei costituiti da ghiaie, sabbie, sabbie travertinose, limi, argille e argille organiche. La permeabilità è molto variabile, in

funzione delle percentuali di limi ed argille che li compongono. Potenzialità acquifera da bassa ad alta. In presenza di fossi e nelle piccole valli i cui alti morfologici sono costituiti da vulcaniti, tali depositi possono includere minerali e piccoli litici vulcanici.

5 **Complesso delle coltri eluvio-colluviali** (b2): Coltri dovute ad alterazione chimico fisica della roccia madre sottostate. Depositi a clasti monogenici, con prevalenza di clasti di selce immersi in matrici di colore rosso acceso. Sono generalmente situati sulle cime dei rilievi o in zone depresse non prossime ai versanti. Presentano spessori limitati. Potenzialità acquifera bassa.

6 **Complesso delle vulcaniti** (VOR): Ceneri da fini a grossolane, alternate con argille palustri e diatomiti. Alla base, tufi litoidi cineritici grigi con inclusi litici carbonatici. Spessore pochi metri. Potenzialità acquifera bassa.

7 **Complesso dei travertini e dei depositi travertinosi** (TBT, SAR, VCV): Travertini di prevalente origine idrotermale, generalmente intercalati a depositi alluvionali e lacustri. Spessori variabili da pochi metri a diverse decine di metri. Potenzialità acquifera alta.

8 **Complesso dei conglomerati** (RMN, UMN, UTB, BTC): Conglomerati poligenici ed eterometrici con differenti potenzialità idriche in funzione del grado di cementazione derivante dal relativo ambiente deposizionale. Spessori variabili da qualche decina ad oltre un centinaio di metri. Potenzialità acquifera da medio-bassa a medio-alta.

9 **Complesso dell'Unità arenaceo-pelitica** (UAP): Arenarie grossolane giallastre e grigie, più o meno cementate, con rari interstrati argilloso marnosi. Esigue falde locali si possono trovare laddove prevalga una fessurazione e/o nelle coltri sabbiose di alterazione più superficiale. Spessore superiore ai 200 metri. Potenzialità acquifera medio-bassa.

10 **Complesso delle Marne a Orbulina** (UAM): Argille e marne argillose di colore grigio ricche in foraminiferi planctonici. Spessore fino a 60 m. Potenzialità acquifera bassa.

11 **Complesso delle calcareniti mioceniche** (CBZ3, CBZ2): Calcareniti bioclastiche in strati o bancate, con strutture a losanga ed intercalazioni di orizzonti calcareo-

marnosi finemente detritici. Spessore complessivo inferiore a 200 metri. Potenzialità acquifera media.

12 **Complesso dell'Unità Spongolitica marnosa** (SPT1b): Alternanze di marne, marne calcaree e marne argillose a colorazione variabile, con intercalazioni calcarenitiche nella parte alta. Spessore fino a 500-600 m. Potenzialità acquifera medio-bassa.

13 **Complesso delle calcareniti** (SPT1a, CFR): Calcareniti avana e nocciola con intercalazioni di calcari marnosi e marne calcaree di colore variabile. Sono presenti selci in noduli, liste o lenti. Spessore complessivo fino a 130 metri. Potenzialità acquifera media.

14 **Complesso delle Scaglie marnoso-argillose** (CDZ, VAS): Calcari marnosi, marne e marne argillose, di colore variabile e strati molto sottili, ai quali si intercalano livelli detritici. Spessore fino a 300 metri. Potenzialità acquifera bassa.

15 **Complesso delle Scaglie calcaree** (SCZ2, SCZ1, SAA, SBI): Calcari micritici e calcari marnosi bianchi e rosa con intercalazioni detritico-organogene e selce di vari colori in liste o noduli. Lo spessore totale è compreso tra i 200 e i 500 metri. Gli affioramenti di questo complesso, dove intensamente fratturati e/o carsificati, contribuiscono alla ricarica degli acquiferi carbonatici del dominio pelagico e di transizione. Potenzialità acquifera medio-alta.

16 **Complesso dei calcari di piattaforma** (CTN, RDT, CIR): Calcari e calcari dolomitici, in strati da sottili a spessi, con livelli e intercalazioni bioclastiche. Spessore fino ad oltre 1000 metri. Potenzialità acquifera alta.

Le indicazioni generali sulle potenzialità acquifere dei differenti complessi riconosciuti nell'area di indagine sono state fornite sulla base delle caratteristiche idrogeologiche che assumono a scala regionale. Tuttavia, durante la campagna di indagini geognostiche effettuata, sono state realizzate delle prove di permeabilità in foro in alcuni di essi per la valutazione del relativo coefficiente di conducibilità idraulica (k). Si segnala che i risultati delle prove eseguite hanno evidenziato in generale dei valori del coefficiente di permeabilità che risultano in assoluto più bassi (di qualche ordine di grandezza) rispetto a quelli generalmente indicati per i complessi che sono potenzialmente in grado di

ospitare delle falde acquifere. Ciò può essere giustificato per il particolare assetto tettonico e strutturale dell'area di indagine, in cui la permeabilità ha una forte dipendenza dallo stato di fratturazione.

Le modalità e relative profondità di esecuzione, nonché i risultati dettagliati delle indagini eseguite sono riportati nel successivo 5.1.7. (prove Lefranc).

Per la determinazione della permeabilità sono state eseguite n.16 prove Lefranc a carico variabile in 6 sondaggi su 4 differenti complessi:

- Complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri e delle alluvioni con piroclastiti rimaneggiate (4, 4b) – Sondaggi 3 BIS, 6, 9, 12;
- Complesso dell'Unità arenaceo-pelitica (11) – Sondaggio 4;
- Complesso delle calcareniti mioceniche (13) – Sondaggio 6;
- Complesso dell'Unità Spongolitica marnosa (15) – Sondaggi 8.

I risultati delle analisi evidenziano un'ampia variabilità del coefficiente di permeabilità in quei complessi caratterizzati da una forte eterogeneità litologica, quale il complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri. All'aumentare della componente argillosa la permeabilità diminuisce fino a 7×10^{-7} m/s, mentre i valori medi rientrano in un range compreso tra 1×10^{-5} m/s e 9×10^{-6} m/s. Di tale variabilità sito-specifica del complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri si è tenuto conto nell'analisi idrogeologica relativa alla valutazione del ruolo che il complesso assume nei confronti delle falde ospitate negli acquiferi carbonatici regionali, ovvero che possa essere in continuità idraulica o che svolga un ruolo di aquitard nei confronti di tali circolazioni idriche sotterranee.

I valori di k associati al complesso delle calcareniti mioceniche ($k_{\text{medio}}: 1.1-1.4 \times 10^{-3}$ m/s) e a quello dell'unità arenaceo-pelitica ($k_{\text{medio}}: 4.8 \times 10^{-7}$ m/s) ne confermano, rispettivamente, l'alta e la bassa potenzialità acquifera. Infine, i risultati relativi alle prove Lefranc sui campioni associati ai complessi dell'Unità Spongolitica marnosa mostrano sempre una più ampia variabilità dei valori del coefficiente di permeabilità dovuta a caratteristiche litologiche eterogenee sito-specifiche e/o a una variabilità dello stato di fratturazione, cui possono essere oggetto tali complessi.

4.2.2 Analisi idrogeochimica

Le acque sotterranee e sorgentizie della media valle dell'Aniene hanno una facies idrochimica prevalentemente bicarbonato-calcica, sebbene con tenori di mineralizzazione diversi in funzione del settore in cui emergono, che possono essere influenzati anche dal contributo di fluidi gassosi di origine profonda che sfruttano in risalita le discontinuità tettoniche.

Il *mixing* tra le acque sotterranee del ciclo carsico vadoso dei Monti Simbruini ed i fluidi di origine profonda assume particolare rilievo nel medio Aniene, determinando sensibili variazioni del chimismo delle acque anche se non tali da modificarne i caratteri bicarbonato-calcici originari che restano riconoscibili. A tal proposito, acque più mineralizzate sono segnalate nel comune di Marano Equo in sinistra idrografica nella piana di Mola di Regno (Capelli et alii, 2012; Percopo, 1998), che presentano anomale concentrazioni in solfati ed un elevato flusso gassoso (CO₂-H₂S) di probabile origine profonda, controllato da lineamenti tettonici attivi nel settore compreso tra la direttrice Olevano-Antrodoco e la depressione strutturale che separa i Monti Ruffi dai Monti Simbruini. Questo processo si accompagnerebbe alla lisciviazione di depositi evaporitici presenti nel substrato triassico e nel basamento regionale dell'idrostruttura Simbruina da parte delle acque profonde che riemergerebbero in superficie arricchite soprattutto di CO₂ con ruolo di *carrier*, seguendo percorsi segnati da discontinuità strutturali attive.

In riva destra ai piedi dei Monti Ruffi nel comune di Anticoli Corrado, sono ubicate una serie di piccole sorgenti, localizzate al contatto con i depositi alluvionali del Fiume Aniene, che presentano minore mineralizzazione rispetto a quelle di Marano Equo, con chimismo bicarbonato-alcalino-terroso (Percopo, 1998).

Il lineamento strutturale Olevano-Antrodoco, oltre che limite di facies nel medio Aniene, assume il ruolo di barriera idraulica tra l'idrostruttura Simbruina e quelle dei Monti Sabini e Ruffi, che a loro volta presentano un chimismo differente.

In sinistra idrografica sul versante orientale dei Monti Ruffi, prossime alla quota del bordo della valle alluvionale, si rinvencono sporadicamente piccole venute d'acqua a livello della strada con portate inferiori al L/s e con regimi molto variabili, alimentate da piccole falde di interesse locale e con chimismo bicarbonato-alcalino-terroso. Sempre dall'idrostruttura dei Monti Ruffi trae alimentazione, più a valle in riva sinistra del Fiume

Aniene, il Fosso Fiumicino, caratterizzato da modesta portata (inferiore al centinaio di L/s) ed un chimismo simile a quello delle sorgenti minori.

Nel settore a valle della diga di Roviano, il Fiume Aniene attraversa le idrostrutture del dominio geologico Umbro-Sabino: in destra idrografica, tra la S.S. Tiburtina (tra i Km 53.0 e 54.0 circa) e il corso d'acqua, sono localizzate una serie di emergenze, non facilmente localizzabili, che in alcuni casi risultano fortemente mineralizzate e associate a manifestazioni gassose. Tali sorgenti (Ponte Arconi, Acqua Zolfa, Solfurea e Sublacense) sono caratterizzate da portate complessive di circa 60 L/s (Boni et alii, 1988) ma presentano caratteristiche idrogeochimiche che le distinguono dalle altre della zona, ricevendo il contributo di fluidi gassosi di probabile origine profonda: la sorgente Solfurea, ubicata ad una quota di circa 315 metri s.l.m., risulta la più arricchita nello ione solfato (Capelli et alii, 2012; Percopo, 1998).

Più a valle sempre in destra idrografica sono localizzate una serie di emergenze riferibili al drenaggio secondario delle idrostrutture dei Monti Sabini meridionali e dei Monti Lucretili-Cornicolani, sia lineari, in corrispondenza delle aste fluviali dei principali immissari dell'Aniene, i Torrenti Ferrata (o Fosso della Scarpa) e Licenza, sia localizzate ai bordi della piana alluvionale in prossimità delle zone di confluenza. A queste si aggiungono alcuni piccoli corsi d'acqua come il Fosso Ronci, che intercettano piccole falde dell'idrostruttura dei Monti Lucretili e Cornicolani. Tutte queste acque sono generalmente caratterizzate da un segnale idrochimico bicarbonato-calcico.

Per la caratterizzazione idrochimica delle acque con cui i tracciati del Nuovo Acquedotto Marcio andranno ad interagire, sono stati individuati 14 punti tra sorgenti (6 punti di campionamento), corsi d'acqua (3 punti di campionamento) e acque sotterranee (5 piezometri), la cui ubicazione è riportata in Figura 4.3. Di questi, 12 sono stati campionati nel mese di Luglio 2021 mentre nel mese di Ottobre 2021 sono stati campionati il piezometro 14 **(9)** e il punto PP nella Via della Vecchia Ferrovia **(8)**.

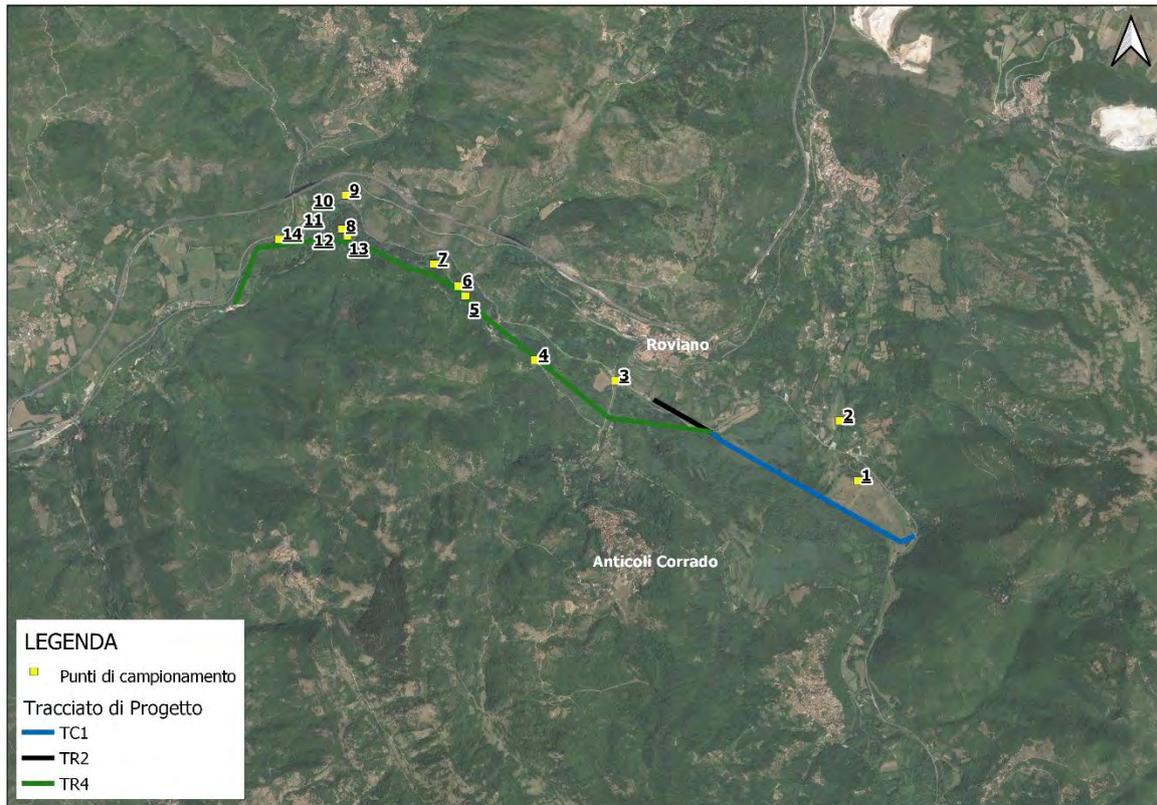


Fig. 4.3: Ubicazione dei punti di campionamento per l'analisi idrochimica.

Per ciascun campione, durante l'esecuzione del prelievo, sono stati misurati i parametri chimico-fisici in sito (temperatura, conducibilità elettrica e pH) riportati nella Tabella 4.1; nella stessa tabella sono annotate altre informazioni quali l'ID del campione, i valori di pH e conducibilità elettrica misurati in laboratorio, il potenziale di ossidoriduzione (REDOX), il DO (ovvero l'ossigeno disciolto) e delle note relative al campionamento opportunamente registrate in sito.

Sigla	Punto	Data	Id campione	Conducibilità elettrica (µS/cm)		Temperatura (°C)	pH		Redox	DO	Note
				In sito	Lab		In sito	Lab			
1	Mola di Regno	lug-21	20455/21	646	701	11,7	7.05	7.1	105	6,0	Il punto di prelievo è dietro l'area di Fiumetto dove vengono convogliate le acque drenate superficialmente. I pozzi non sono campionabili in quanto veno attivati solo per uso emergenziale.
2	Torrente Bagnatore	lug-21	20457/21	550	579	14,0	7.97	7.9	132	8,8	
3	Sorgente Ponte Anticoli	lug-21	20456/21	645	689	13,0	7.35	7.0	-	5,8	Sorgente Ponte Anticoli. Redox considerato non affidabile
4	PZ4	lug-21	20464/21	412	423	13,9	8.09	7.4	61	0,4	campionamento con pompa low-flow
5	PZ8	lug-21	20458/21	510	535	14,5	7.5	7.2	155	7,8	campionamento con pompa low-flow
6	Sorgente travertino	lug-21	20465/21	307	284	15,0	8.3	8.1	218	8,0	
7	PZ9	lug-21	20466/21	446	477	14,2	8,00	7,8	67	0,8	Piezometro S9, campionamento con pompa low-flow, livello statico 3.35 m da pc
8	PP2 (Via della Vecchia Ferrovia)	ott-21	34619/21	1600	1638	17,3	6.21	6.4	-183	1,5	
9	S14	ott-21	34620/21	1275	1308	15,0	6.20	6.4	115	0,8	
10	Fosso ferrata sponda sx	lug-21	20471/21	1048	1179	14,1	7.34	7.4	180	6,4	
11	Fosso scarpa sponda dx	lug-21	20470/21	1162	1065	14,8	7.54	7.3	203	4,9	
12	Sorgente S13	lug-21	20467/21	1510	1520	15,9	6.98	6.8	-125	1,5	Sentori sulfurei
13	Sorgente mineralizzata	lug-21	20468/21	1390	1384	19,2	7.5	7.2	145	4,0	
14	Sorgente fine via Ferrovia	lug-21	20469/21	758	803	13,1	7.47	7.2	208	6,8	

Tabella 4.1: Elenco e parametri chimico-fisici dei punti di monitoraggio idrochimico.

La conducibilità elettrica dei punti campionati è generalmente compresa tra quasi 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, per quelle acque poco mineralizzate come nel caso del punto 6, riferito ad una piccola sorgente ubicata al bordo della valle alluvionale del Fiume Aniene sul versante orientale dei Monti Ruffi, e i 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valore misurato per le sorgenti di Mola di Regno (1 in Figura 4.4). Rispetto a tali valori, si differenziano i punti 8-9-10-11-12 e 13, nonché in parte 14, che risultano ubicati tutti nella zona di confluenza del Fosso della Scarpa nel Fiume Aniene. Questi sono caratterizzati da valori di conducibilità superiori ai 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4.4): in particolare, la mineralizzazione più elevata viene raggiunta sulla riva sinistra del Fiume Aniene, dove sono ubicati i punti 8 (fino ad oltre 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$), 12 e 13. Infine, il valore della conducibilità elettrica presso il punto di campionamento 14 (circa 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), relativo ad una polla sorgiva ubicata subito a valle del gruppo precedente, indica che la più alta mineralizzazione è limitata ad un settore ben definito e che, invece, presso tale punto arrivano acque che risultano solo in parte influenzate dai medesimi processi che avvengono subito a monte.

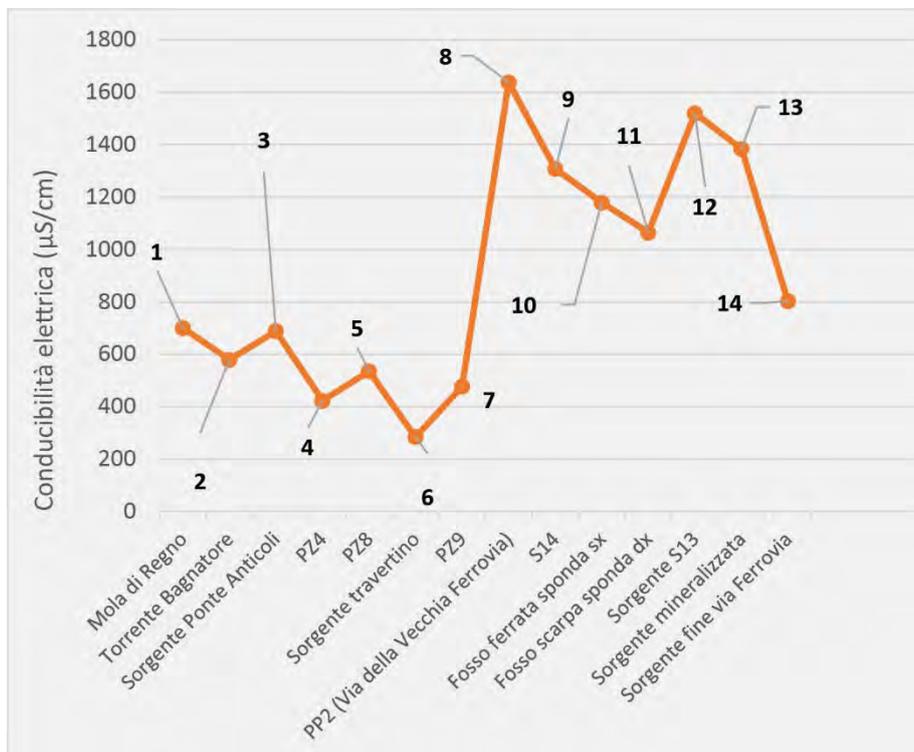


Fig. 4.4: Conducibilità elettrica (in $\mu\text{S}/\text{cm}$) misurata in laboratorio per i campioni analizzati.

Le concentrazioni degli elementi maggiori, determinate mediante le analisi chimiche ed espresse in meq/l, sono riportate nella tabella 4. 2. In tabella 4.3 sono riportati i risultati relativi alle concentrazioni di altri ioni che sono stati determinati per gli stessi campioni.

Id	Description	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	F	NO3
1	Mola di Regno	5,64	2,72	0,15	0,06	0,21	0,14	8,60	0,00	0,03
2	Torrente Bagnatore	4,99	1,72	0,23	0,05	0,24	0,13	6,93	0,01	0,06
3	Sorgente Ponte Anticoli	5,89	2,14	0,19	0,09	0,26	0,16	8,10	0,01	0,06
4	PZ4	4,15	0,48	0,21	0,03	0,21	0,12	4,90	0,00	0,01
5	PZ8	5,69	0,25	0,22	0,03	0,27	0,12	6,10	0,00	0,00
6	Sorgente travertino	2,84	0,21	0,20	0,01	0,25	0,11	3,52	0,00	0,00
7	PZ9	4,75	0,67	0,28	0,05	0,20	0,15	5,39	0,00	0,00
8	PP2 (Via della Vecchia Ferrovia)	17,56	3,59	0,51	0,19	0,19	0,36	23,60	0,02	0,00
9	S14	14,37	2,37	0,28	0,05	0,23	0,38	16,45	0,01	0,00
10	Fosso ferrata sponda sx	11,98	1,60	0,24	0,04	0,25	0,31	14,54	0,01	0,01
11	Fosso scarpa sponda dx	13,42	1,76	0,32	0,09	0,32	0,35	13,16	0,07	0,00
12	Sorgente S13	17,02	3,50	0,28	0,06	0,31	0,42	19,52	0,01	0,00
13	Sorgente mineralizzata	15,52	3,14	0,29	0,05	0,27	0,35	17,73	0,02	0,00
14	Sorgente fine via Ferrovia	8,23	1,67	0,19	0,03	0,21	0,18	9,65	0,01	0,02

Tabella 4.2: Concentrazioni degli elementi maggiori (in meq/l) misurati nei campioni analizzati.

Id	Description	CaCO3 mg/l	P2O5 mg/l	SiO2 mg/l	Al µg/l	Ba µg/l	Co µg/l	Fe µg/l	Li µg/l	Mn µg/l	Rb µg/l	Sr µg/l	Zn µg/l
1	Mola di Regno	430	<0.05	5.7	<1.0	18.5	<0.2	<5.0	1.8	0.6	2.2	222.6	2.4
2	Torrente Bagnatore	347	0.07	6.2	1.2	30.0	<0.2	<5.0	1.0	5.0	1.4	213.4	15.4
3	Sorgente Ponte Anticoli	405	<0.05	6.9	<1.0	23.4	<0.2	5.6	1.9	1.0	1.3	225.4	20.0
4	PZ4	245	<0.05	12.9	2.6	31.0	0.1	139.5	<1.0	244.9	1.8	392.8	2.9
5	PZ8	305	<0.05	16.4	<1.0	46.1	<0.2	<5.0	<1.0	<0.2	1.6	555.2	5.4
6	Sorgente travertino	176	<0.05	18.4	<1.0	41.5	0.0	<5.0	<1.0	0.1	<1.0	424.3	2.5
7	PZ9	270	<0.05	20.9	3.6	161.7	1.9	162.1	3.7	61.5	3.1	706.2	9.6
8	PP2 (Via della Vecchia Ferrovia)	1180	<0.05	35.3	49.6	264.1	1.1	3911.0	28.9	160.3	57.1	1403.0	292.0
9	S14	823	<0.05	25.7	82.5	214.8	0.6	175.1	14.2	163.0	4.8	1188.0	19.4
10	Fosso ferrata sponda sx	727	<0.05	17.0	<1.0	170.7	0.0	27.0	6.3	3.5	3.0	784.1	13.1
11	Fosso scarpa sponda dx	658	<0.05	18.8	5.8	186.6	0.0	27.8	7.8	3.0	4.7	864.7	35.9
12	Sorgente S13	976	<0.05	18.5	2.6	151.8	0.5	328.0	10.1	75.9	4.0	844.2	9.6
13	Sorgente mineralizzata	887	0.19	16.9	2.9	214.5	0.9	84.4	11.2	164.3	4.0	891.6	14.0
14	Sorgente fine via Ferrovia	483	<0.05	10.4	2.0	82.8	0.0	12.5	3.2	1.0	2.8	417.7	6.3

Tabella 4.3: Determinazione delle concentrazioni di altri ioni per i campioni d'acqua analizzati.

Attraverso la rappresentazione di Piper (Figura 4.5) è possibile catalogare le acque analizzate come bicarbonato-calciche, ad indicare una stessa matrice che risulta essere prevalentemente di origine carbonatica.

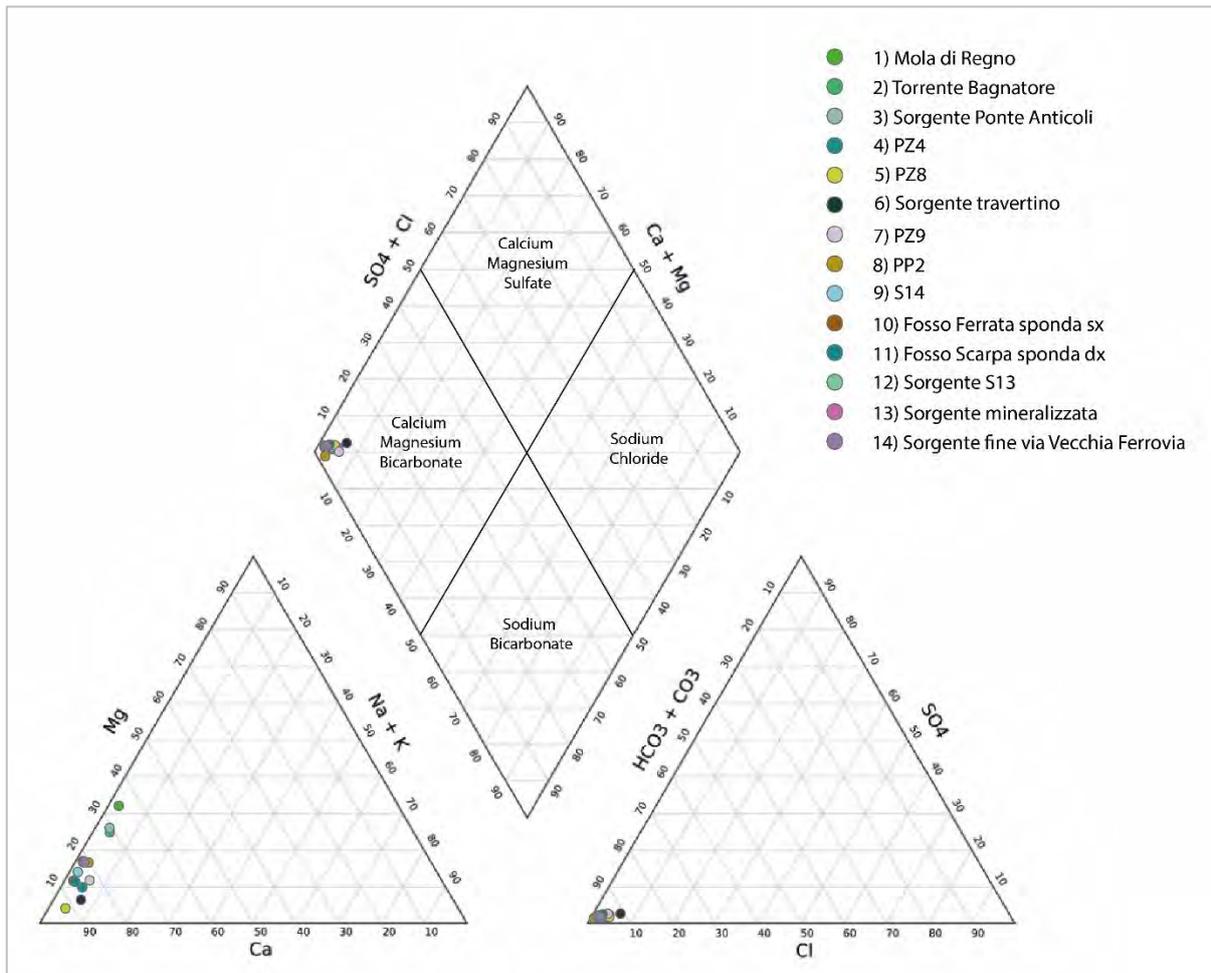


Fig. 4.5: Classificazione delle acque campionate mediante il Diagramma di Piper.

All'interno del medesimo gruppo, le acque sono caratterizzate da un elevato contenuto di elementi alcalino-terrosi Ca^{2+} e secondariamente di Mg^{2+} . Dal diagramma di Chebotarev si osserva una composizione essenzialmente bicarbonato-calcica.

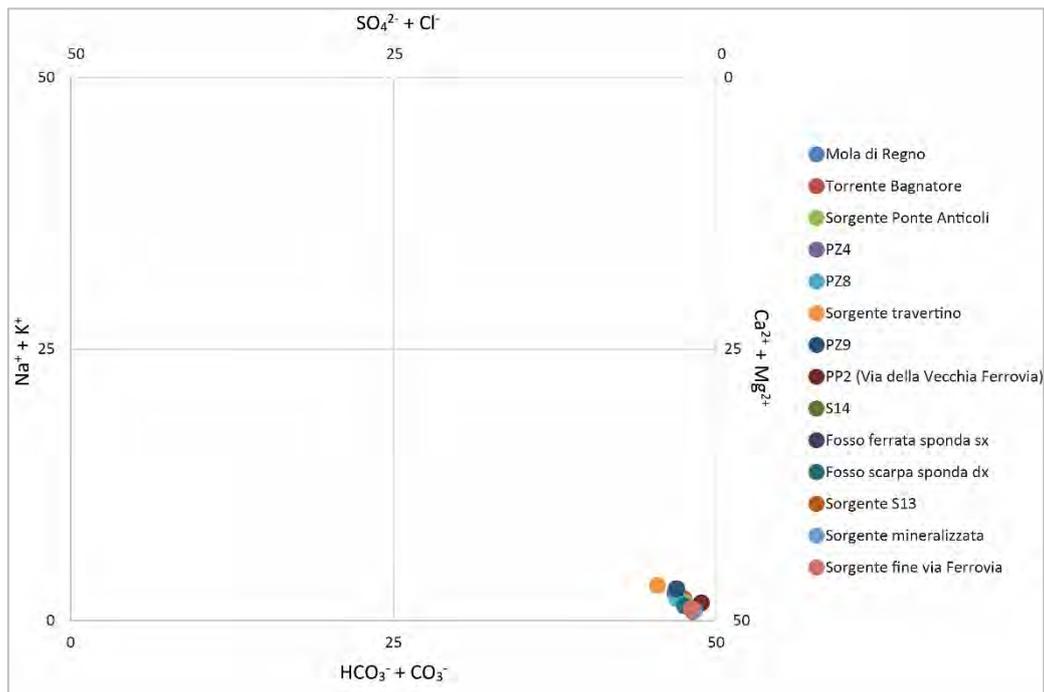


Fig. 4.6: Classificazione delle acque campionate mediante il Diagramma di Chebotarev a composizione bicarbonato-calcica.

I risultati delle analisi degli elementi maggiori sono stati rappresentati, infine, tramite il diagramma di Schoeller che permette di individuare le caratteristiche geochimiche delle acque, che sono funzione oltre che delle rocce con cui interagiscono nel sottosuolo, anche del tempo e del percorso compiuto. Nella rappresentazione contemporanea di più campioni, la presenza di segmenti delle spezzate con uguale pendenza indica un uguale rapporto tra gli ioni che uniscono, pertanto diverse spezzate con tratti paralleli tra loro indicano acque che hanno avuto processi di interazione acqua-roccia simili.

L'analisi degli elementi maggiori mostra chiaramente l'appartenenza di tutti i campioni alla facies idrogeochimica bicarbonato-calcica, ma questi sono caratterizzati da differenze geochimiche che ne consentono una ulteriore classificazione. I campioni prelevati presso le sorgenti di Mola di Regno (**1**), il Torrente Bagnatore (**2**) e la sorgente di Ponte Anticoli (**3**), si distinguono perché hanno un contenuto maggiore in magnesio (tra 20 e 33 mg/l), evidenziando una circolazione in litologie esclusivamente calcaree che avviene all'interno dell'idrostruttura Simbruina (Figura 4.7).

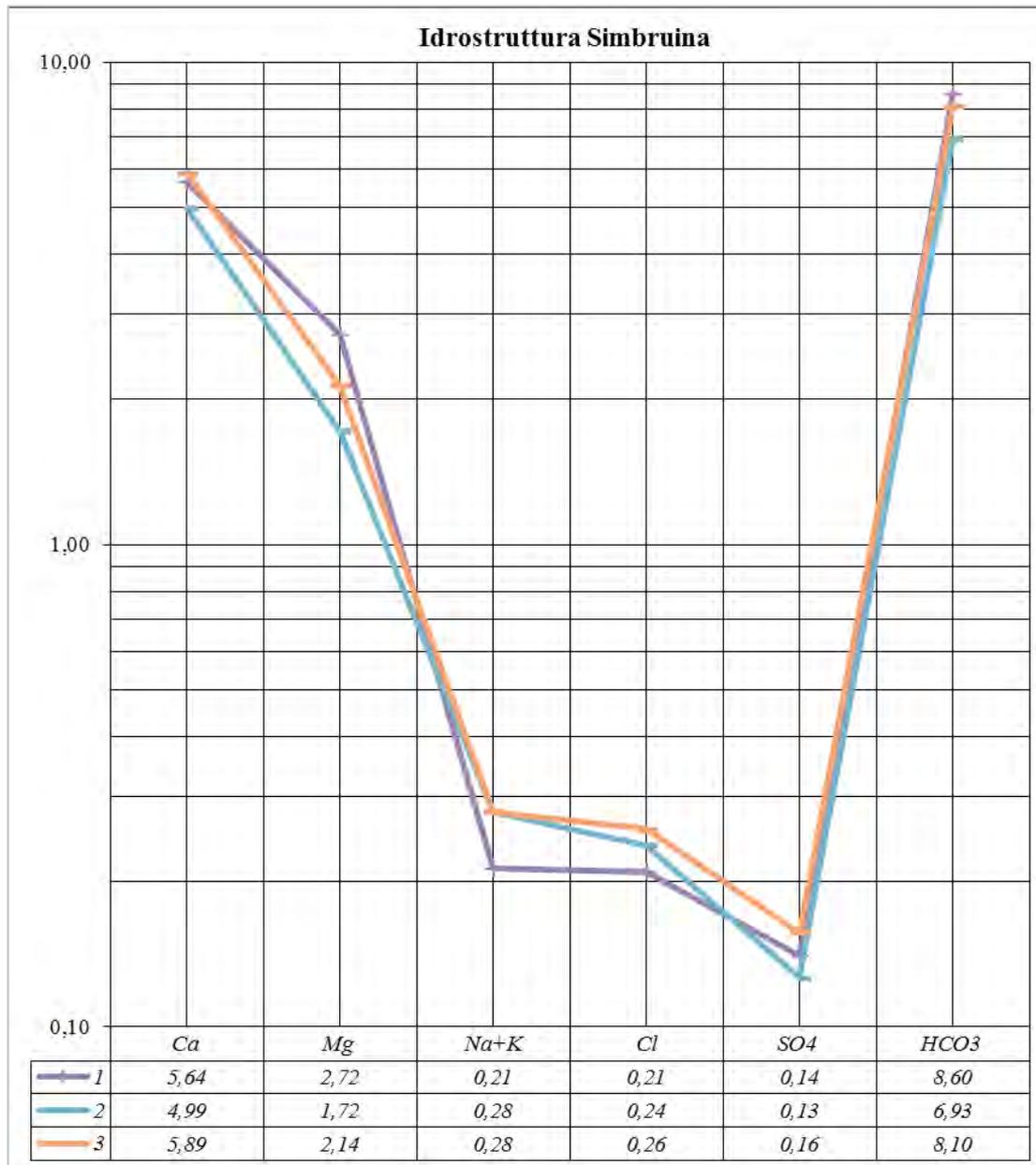


Fig. 4.7: Diagramma di Schoeller delle concentrazioni in meq/L degli elementi maggiori dei campioni 1, 2 e 3.

Le acque campionate nei piezometri PZ4 (4), PZ8 (5) e PZ9 (7), realizzati in riva destra della valle del Fiume Aniene nei settori a monte e a valle della traversa di Roviano, presentano concentrazioni simili a quelli precedenti ma minori in magnesio (tra 3 ed 8 mg/l) e bicarbonato (Figura 4.8). Tali caratteristiche dipendono da una diluizione che avviene all'interno del complesso delle alluvioni delle acque provenienti dall'acquifero dei Simbruini, con cui sono in continuità. Le concentrazioni negli ioni sodio, potassio e

cloro variano a seconda della componente marnosa e argillosa delle alluvioni nei diversi punti di campionamento.

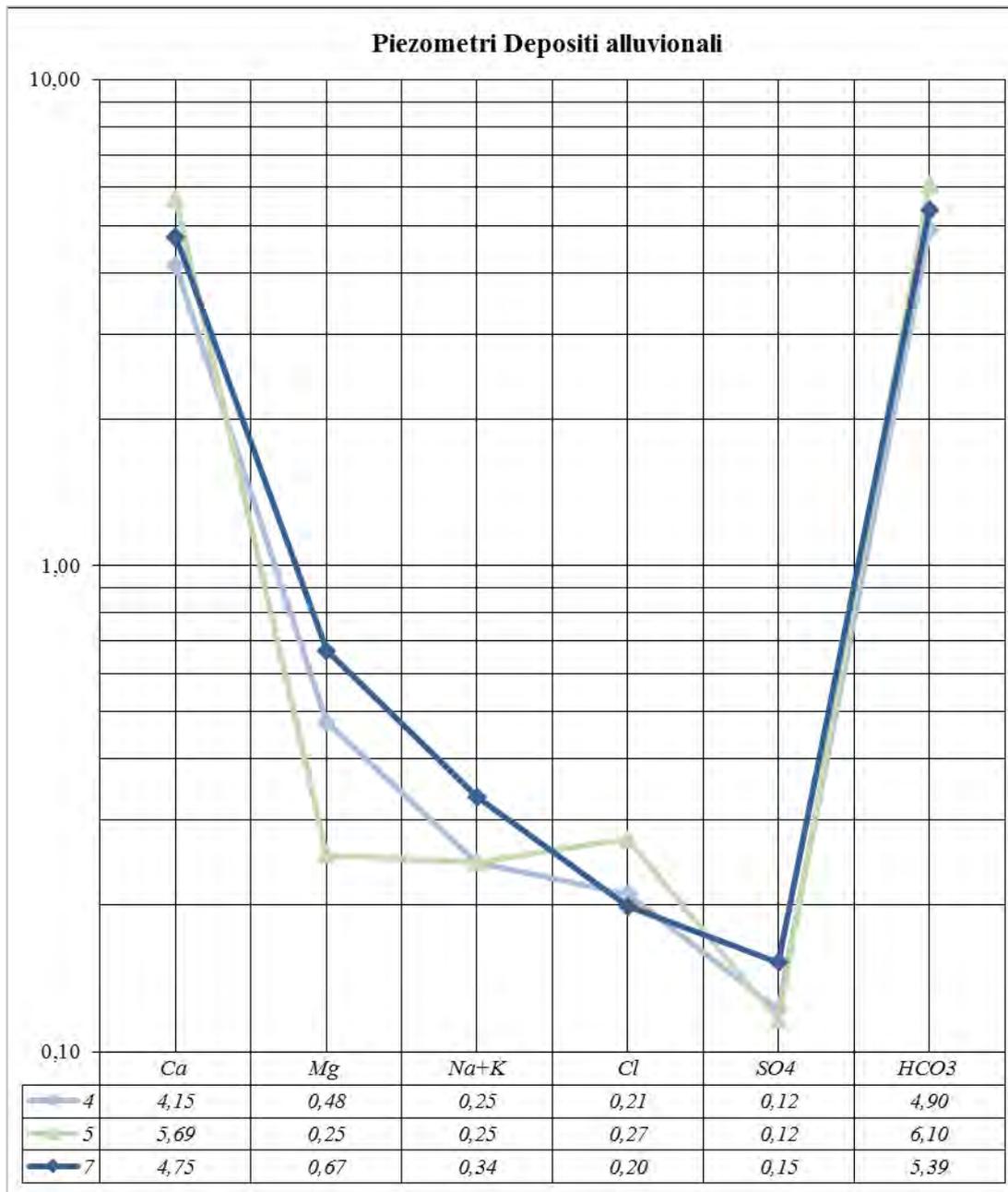


Fig. 4.8: Diagramma di Schoeller delle concentrazioni in meq/L degli elementi maggiori dei campioni 4, 5 e 7.

Il gruppo costituito dai campioni prelevati presso il sondaggio PP2 presso via della vecchia ferrovia (8), il piezometro PZ14 (9), i due rami del Fosso della Scarpa presso la S.S. Tiburtina (10 e 11), la sorgente ubicata presso il sondaggio 13 (12) e la sorgente mineralizzata lungo la via della vecchia ferrovia (13), presenta come detto una

maggior mineralizzazione (Figura 4.9), evidenziata anche dai valori di conducibilità elettrica elevati. In particolare, si distinguono perché hanno un contenuto elevato in magnesio (tra 20 e quasi 44 mg/l) ed in solfati (compresi tra 15 e 20 mg/l); le concentrazioni in sodio, potassio e cloro, anche queste non trascurabili, indicano che vi è una influenza della componente marnosa e argillosa presente nei depositi alluvionali.

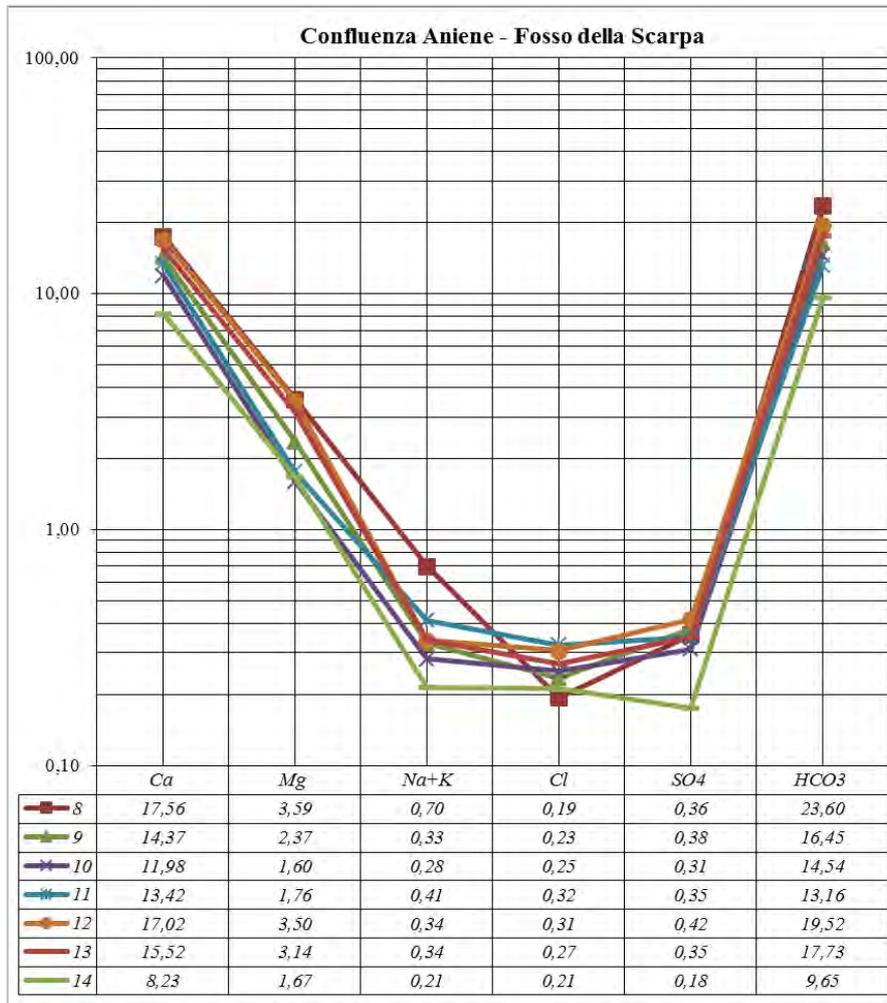


Fig. 4.9: Diagramma di Schoeller delle concentrazioni in meq/L degli elementi maggiori dei campioni 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14.

Il campione prelevato presso una polla sorgiva localizzata alla fine della via della vecchia ferrovia (14) evidenzia una diminuzione nelle concentrazioni degli elementi sopra rilevati, indicando che la più alta mineralizzazione del gruppo è limitata ad un settore ben definito e che, invece, presso tale punto arrivano acque che risultano solo in parte influenzate dai medesimi processi che avvengono subito a monte.

Quanto sopra esposto sulla mineralizzazione del settore ubicato alla confluenza del Fosso della Scarpa nel Fiume Aniene lascia presupporre che le acque che emergono in questo settore siano alimentate da una circolazione idrica sotterranea più profonda che riemerge in questo settore probabilmente sfruttando gli elementi tettonici presenti. Date le scarse informazioni pregresse a riguardo e nell'ottica di approfondire le conoscenze degli acquiferi con cui i tracciati del Nuovo Acquedotto Marcio andranno ad interagire, si consiglia di realizzare ulteriori monitoraggi per definire meglio le modalità di emergenza delle acque sotterranee in questo settore.

All'idrostruttura dei Monti Ruffi, fanno riferimento i campioni della sorgente del travertino lungo la via della vecchia ferrovia (6) il quale presenta concentrazioni non trascurabili in magnesio, sodio, potassio e cloruro (Figura 4.10).

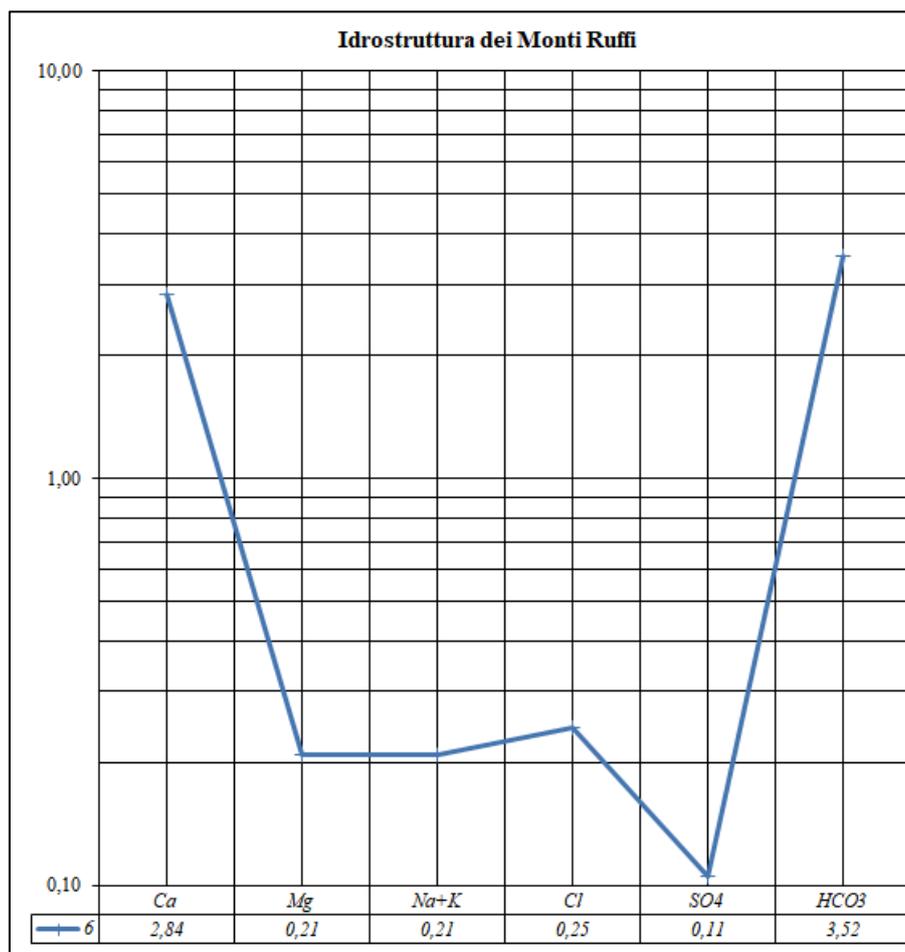


Fig. 4.10: Diagramma di Schoeller delle concentrazioni in meq/L degli elementi maggiori del campione 6.

Il campionamento idrochimico svolto ha quindi permesso di discriminare come nell'area di progetto siano distinguibili essenzialmente 3 facies idrochimiche (Fig. 4.11 – Fig. 4.12). Le prime due facies idrochimiche interessano acque circolanti nell'area della piana di Mola di Regno e traggono la loro origine rispettivamente dall'acquifero carbonatico simbruino (campione n.1 – Mola di Regno) e dall'acquifero alluvionale a contatto con quest'ultimo (campione n.5 – PZ8). La terza facies idrochimica, presente nell'area finale del tracciato (Valle Stretta), interessa invece acque provenienti dall'acquifero carbonatico sabino (campione n.10 - Fosso ferrata sponda dx e campione n. 12 - sorgente S13).

Id	Description	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	F	NO3
1	Mola di Regno	5,64	2,72	0,15	0,06	0,21	0,14	8,60	0,00	0,03
2	Torrente Bagnatore	4,99	1,72	0,23	0,05	0,24	0,13	6,93	0,01	0,06
3	Sorgente Ponte Anticoli	5,89	2,14	0,19	0,09	0,26	0,16	8,10	0,01	0,06
4	PZ4	4,15	0,48	0,21	0,03	0,21	0,12	4,90	0,00	0,01
5	PZ8	5,69	0,25	0,22	0,03	0,27	0,12	6,10	0,00	0,00
6	Sorgente travertino	2,84	0,21	0,20	0,01	0,25	0,11	3,52	0,00	0,00
7	PZ9	4,75	0,67	0,28	0,05	0,20	0,15	5,39	0,00	0,00
8	PP2 (Via della Vecchia Ferrovia)	17,56	3,59	0,51	0,19	0,19	0,36	23,60	0,02	0,00
9	S14	14,37	2,37	0,28	0,05	0,23	0,38	16,45	0,01	0,00
10	Fosso ferrata sponda sx	11,98	1,60	0,24	0,04	0,25	0,31	14,54	0,01	0,01
11	Fosso scarpa sponda dx	13,42	1,76	0,32	0,09	0,32	0,35	13,16	0,07	0,00
12	Sorgente S13	17,02	3,50	0,28	0,06	0,31	0,42	19,52	0,01	0,00
13	Sorgente mineralizzata	15,52	3,14	0,29	0,05	0,27	0,35	17,73	0,02	0,00
14	Sorgente fine via Ferrovia	8,23	1,67	0,19	0,03	0,21	0,18	9,65	0,01	0,02

Fig. 4.11: Concentrazione degli elementi maggiori (in meq/l) misurati nei campioni analizzati.

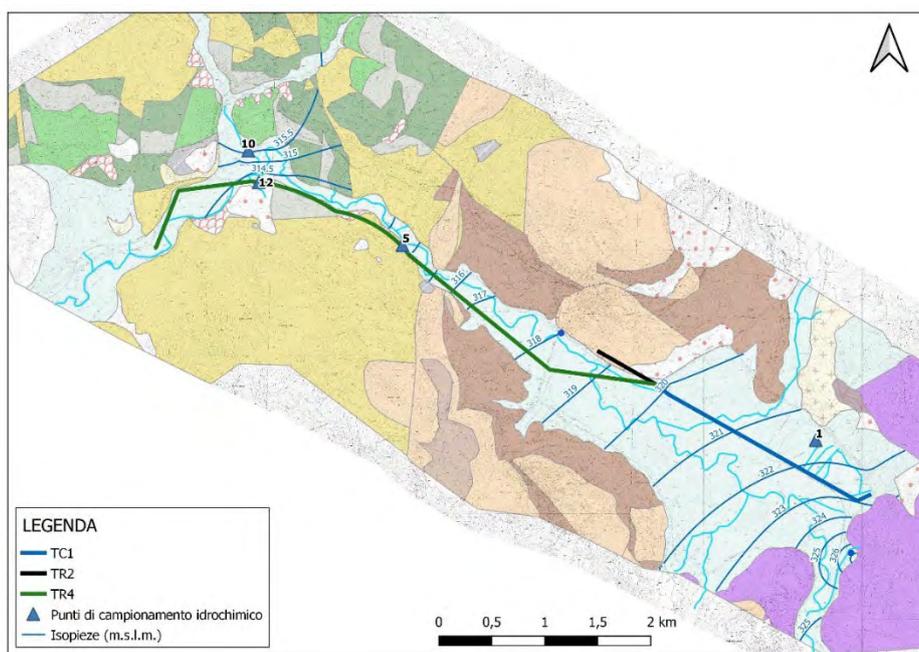


Fig. 4.12: Planimetria con ubicazione dei 4 campioni di acque ritenuti maggiormente rappresentative delle 3 facies idrochimiche individuate.

Come prima introdotto, nell'area di Mola di Regno risultano presenti essenzialmente due acquiferi, un primo acquifero carbonatico regionale legato all'idrostruttura Simbruina ed un secondo acquifero di natura alluvionale legato alle dinamiche deposizionali del Fiume Aniene. Le analisi chimiche eseguite su due campioni rappresentativi (campione n.1 – Mola di Regno (idrostruttura simbruina) e campione n. 5 PZ8 (acquifero alluvionale) hanno permesso di riscontrare come queste due acque presentino differenze sostanziali le quali sono riassumibili in una riduzione di concentrazione dello ione Mg ed un arricchimento degli ioni Na, K e Cl legati alla componente marnosa e argillosa delle alluvioni con i quali le acque entrano a contatto (Figura 4.13).



Fig. 4.13: Diagramma di Schoeller dell'area di Mola di Regno.

Proseguendo lungo il tracciato di progetto, si riscontra il passaggio dall'acquifero dell'idrostruttura Simbruina a quello dell'idrostruttura Sabina. Confrontando le acque del campione n.1 – Mola di Regno (idrostruttura simbruina) con le acque del campione n.12 – Sorgente S13 (idrostruttura sabina) è possibile notare come le acque circolanti nei due acquiferi presentino evidenti differenze nei rapporti caratteristici Mg/Ca e Cl/SO4 (Figura 4.14).

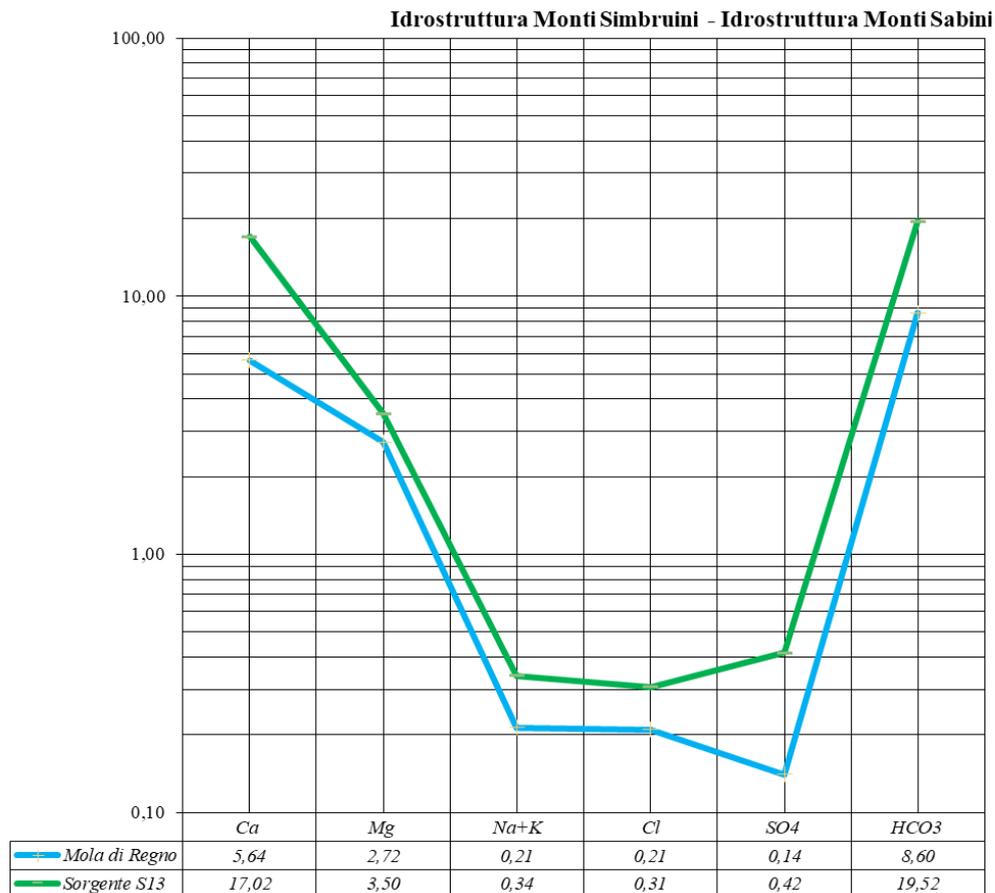


Fig. 4.14: Diagramma di Schoeller con confronto tra le acque dell' idrostruttura Sabina e quella Simbruina.

Ulteriore aspetto di interesse risulta essere quello relativo alle acque campionate nel fosso della Ferrata (campione n.10) e nella sorgente S13 (campione n.12). Questi due punti di campionamento permettono di constatare come entrambe le acque presenti sulla sponda destra e sinistra di questo tratto del Fiume Aniene, siano legate all'idrostruttura dei Monti Sabini, così come testimoniato dalle risultanze del diagramma di Schoeller di seguito riportato in Figura 4.15.

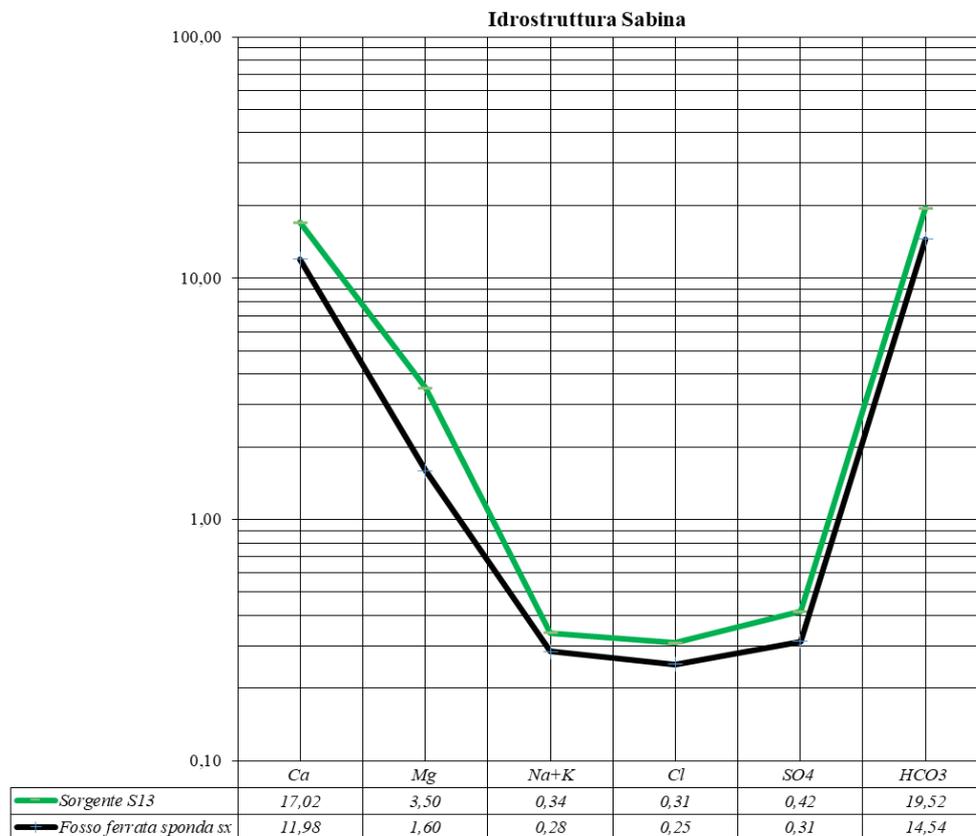


Fig. 4.15: Diagramma di Schoeller dell'idrostruttura Sabina nell'area di Valle Stretta. Dal grafico si evince come le acque in destra e sinistra idrografica del Fiume Aniene presentino la medesima facies idrochimica.

4.2.3 Analisi idrogeologica quantitativa – Misure di portata

Tra i mesi di luglio ed ottobre 2021 sono state realizzate una serie di misure della portata in alveo finalizzate alla valutazione quantitativa delle acque sotterranee emergenti in alcuni settori della Media valle del Fiume Aniene, con particolare riguardo all'asta fluviale del principale corso d'acqua e di alcuni dei suoi maggiori affluenti.

La scelta delle 4 sezioni in cui sono state realizzate le misure di portata, la cui ubicazione è riportata in Figura 4.16 e i cui valori delle misure di portata sono dettagliati in Tabella 4.4, è stata agevolata dalla necessità di avere una valutazione aggiornata degli apporti sorgivi presenti nell'area di indagine ed indicati dalla letteratura e cartografia idrogeologica (Boni et alii, 1986; Boni et alii, 1988; Capelli et alii, 1987; Capelli et alii, 2012).

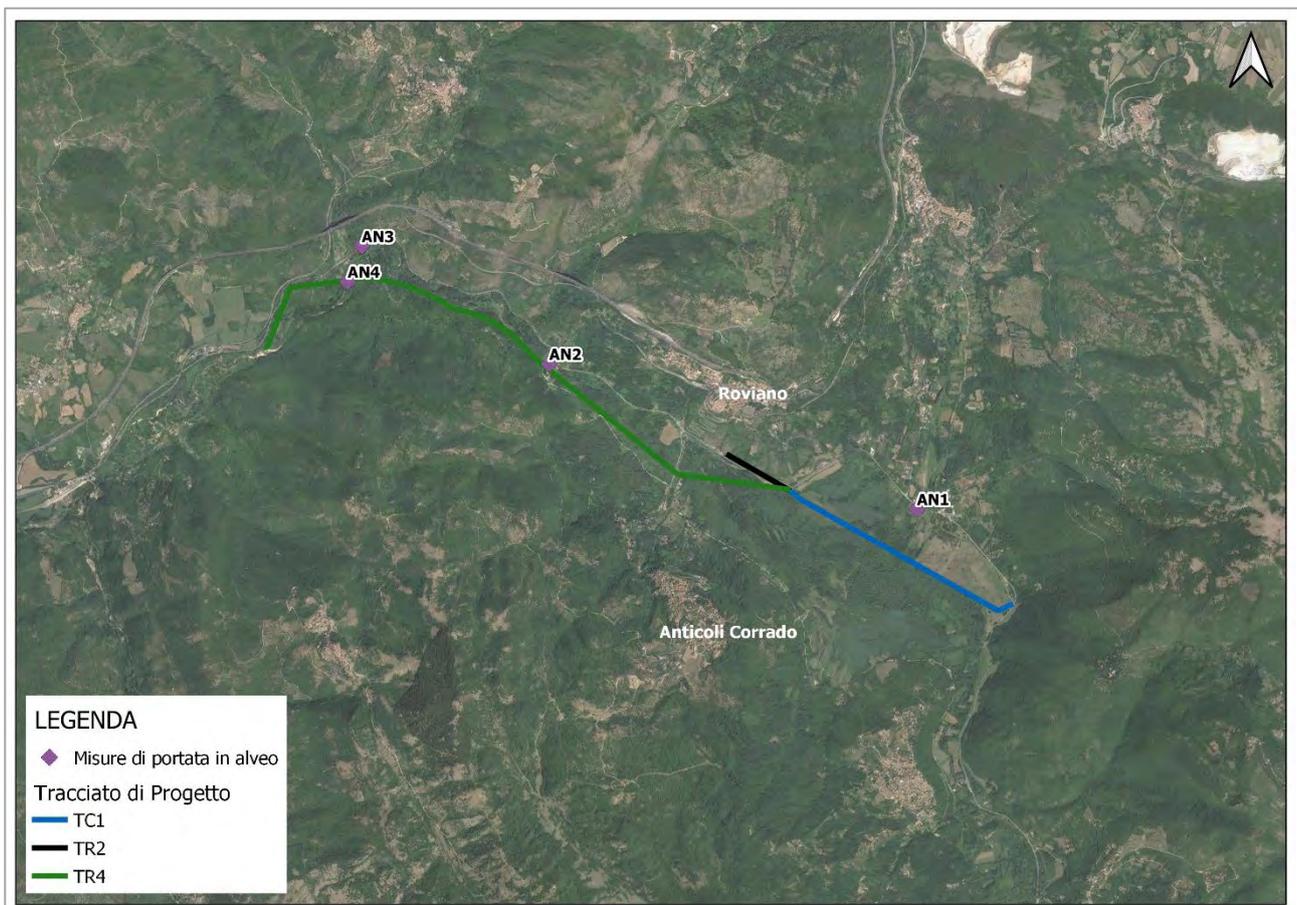


Fig. 4.16: Ubicazione delle misure di portata realizzate, indicate in carta da una sigla relativa al bacino idrografico di appartenenza (AN) e un numero progressivo da 1 a 4.

Sigla	Riferimento misura	lug-21	ago-21	set-21	ott-21
		Portata misurata (L/s)			
AN1	Fosso Bagnatore presso S.S. Sublacense	532	569	442	391
AN2	Aniene valle traversa Roviano	1193	1066	1115	899
AN3	Fosso della Scarpa (Torrente Ferrata) presso S.S.5	264	228	200	183
AN4	Aniene a valle ponte via della vecchia ferrovia	2857	2564	2677	2350

Tabella 4.4: Risultati delle misure di portata (in L/s).

I risultati delle misure condotte hanno messo in risalto alcuni aspetti che assumono un ruolo rilevante nella valutazione della possibile interferenza dei tracciati di progetto con gli acquiferi che intercettano, con particolare riguardo a quelli regionali.

Per comprendere la valenza dei risultati ottenuti è necessario presentare l'assetto idrogeologico locale da bibliografia, i cui riferimenti principali sono i seguenti:

- Boni, Bono, Capelli (1986) Schema idrogeologico dell'Italia centrale. Mem. Soc. Geol. It., 35: 991-1012, 2 carte.
- Boni, Bono, Capelli (1988) Carta idrogeologica del territorio della Regione Lazio. Scala 1:250.000
- Capelli, Cosentino, Messina, Raffi, Ventura (1987) Modalità di ricarica e assetto strutturale dell'acquifero delle sorgenti Capore-S. Angelo (Monti Lucretili-Sabina meridionale). Geologica Romana, 26, 419-447
- Capelli, Mastroiillo, Mazza, Petitta (2012) Carta delle unità idrogeologiche della Regione Lazio. Scala 1:250.000

Il bacino del medio Aniene, con chiusura a valle di Ponte Anticoli, nel settore che si estende in destra idrografica è rappresentato dalla idrostruttura Simbruina a cui fanno riferimento le sorgenti del Gruppo di Agosta, parzialmente captate dall'ACEA per alimentare l'acquedotto Marcio.

La pianura alluvionale dell'Aniene nel settore tra Marano Equo ed Anticoli Corrado presenta numerose sorgenti con caratteristiche idrochimiche differenziate e con portata complessiva di 500 L/s. Le acque di in-filtrazione alimentano il Fiume Aniene sotto forma di sorgenti lineari nei tratti d'alveo in cui il thalweg raggiunge il livello di saturazione dell'idrostruttura. È questo il caso del Rio Bagnatore, tributario in riva destra del Fiume Aniene a valle della zona di Mola di Regno che, con alveo posto a quote confrontabili con le sorgenti del Gruppo di Agosta (circa 325 metri s.l.m.), risulta drenante dal settore immediatamente a monte della S.P. Sublacense dalla sorgente Aliucci fino alla

confluenza, per una portata complessiva valutata diversamente in 500 L/s (Boni et alii, 1988) o in 90 L/s (Capelli et alii, 2012).

I depositi alluvionali dell'Aniene in località Fiumetto e Mola di Regno sono saturati in profondità dalla falda regionale Simbruina con livelli piezometrici prossimi al piano campagna e locali condizioni di artesianità favorite dai litotipi limoso-argillosi che compongono l'acquifero alluvionale.

Il lineamento strutturale Olevano-Antrodoco, oltre che limite di facies nel medio Aniene, assume il ruolo di barriera idraulica tra l'idrostruttura Simbruina e quelle dei Monti Sabini e Ruffi.

Le sorgenti localizzate lungo il lineamento tettonico a quote medio-alte caratterizzano situazioni idrogeologiche di interesse locale, riconducibili a falde sospese per altro poco produttive. È il caso della sorgente Sossanti ubicata a 500 metri s.l.m. sul versante orientale dei Monti Ruffi e con portata di qualche L/s. Sempre in sinistra idrografica ma prossime alla quota del bordo della valle alluvionale, si rinvengono sporadicamente piccole venute d'acqua a livello della strada con portate inferiori al L/s e con regimi molto variabili, alimentate da piccole falde di interesse locale alla base del versante orientale dei Monti Ruffi.

Nel settore a valle della diga di Roviano, il Fiume Aniene attraversa le idrostrutture del dominio geologico umbro-sabino: in destra idrografica, tra la S.S. Tiburtina (tra i Km 53.0 e 54.0 circa) e il corso d'acqua, sono localizzate una serie di emergenze, non facilmente localizzabili, che in alcuni casi risultano fortemente mineralizzate e associate a manifestazioni gassose. Tali sorgenti (Ponte Arconi, Acqua Zolfa, Solfurea e Sublacense) sono caratterizzate da portate complessive di circa 60 L/s (Boni et alii, 1988) ma presentano caratteristiche idrogeochimiche che le distinguono dalle altre della zona, ricevendo il contributo di fluidi gassosi di origine profonda, come ad esempio per la sorgente Solfurea, ubicata ad una quota di circa 315 metri s.l.m., che risulta da letteratura la più arricchita nello ione solfato tra quelle analizzate dell'area di studio.

Più a valle sempre in destra idrografica sono localizzate una serie di emergenze sia lineari, in corrispondenza delle aste fluviali dei principali immissari dell'Aniene, i Torrenti Ferrata e Licenza, sia localizzate ai bordi della piana alluvionale in prossimità delle zone di confluenza.

Il Torrente Ferrata risulta drenare per una portata media di 200 L/s la falda basale dei Monti Sabini meridionali al di sotto dei 320 metri s.l.m., nel settore compreso tra il viadotto dell'autostrada A24 e la S.S. Tiburtina; nei pressi di quest'ultima è localizzato sia in destra che in sinistra idrografica del Fosso della Scarpa, il gruppo di sorgenti Morgia Rossa, Osteria Ferrata ed Acetosa, per una portata complessiva di circa 100 L/s (Boni et alii, 1988).

Dalla ricostruzione idrogeologica eseguita da Capelli et alii (1987) (Figura 4.17) e ripresa da Boni et alii (1988) in tale settore emergerebbero complessivamente 360 L/s, valore leggermente sottostimato rispetto ai 500 L/s valutati da Capelli et alii, 2012. Questi ultimi, inoltre, indicano la presenza di apporti sorgivi nel Fiume Aniene tra Marano Equo e Tivoli (a quote comprese tra 320 e 260 metri) di 2500 L/s, riprendendo quanto indicato da Capelli et alii (1987) e da Boni et alii (1988) ma con una portata di 2000 L/s.

Num. Rifer.	DENOMINAZIONE DELLA SORGENTE	GAS	QUOTA (m s.l.m.)	T °C	SALINITA' mg/l	PORTATA l/sec.	NOTE
1	"Acque Albule" - Emissario del Lago della Colonnella	+	70	23	2450	200	Media tra misure storiche e misure recenti
2	"Acque Albule" - Emissario del Lago della Regina	+	69	23	2670	1850	Media tra misure storiche e misure recenti
3	Sorgente Acquoria	+	75	15	750	1000	Captata
4	Sorgente lineare F. Aniene tra le quote 80 e 50, escluso il contributo delle sorgenti n°1,2,3	+	80-50	-	-	2000	
5	Sorgente di Cretone	+	67	23	3800	40	Captata
6	Sorgente di Farfa		100	18	1420	130	
7	Gruppo di sorgenti di Capore-S. Angelo		500-400	10-11.5	240	300	Parzialmente captate
8	Sorgente Villa D'Orazio		500	12	-	20	
9	Sorgente lineare Fosso dei Ronci		262	15	350	100	
10	Sorgente lineare Fosso Licenza		295	12.5	630	150	
11	Sorgente lineare F. Aniene tra la quota 270 e 80, escluso il		270-80	9.6	230	2000	
12	Sorgente lineare Fosso Empiglione		240	-	-	50	
13	Sorgente lineare Fosso Fiumicino		290	17	305	50	
14	Sorgente lineare Fosso Ruara		307	-	-	40	
15	Gruppo sorgenti Morgia Rossa, Osteria Ferrata e Acetosa	+	320-315	13	920	100	
16	Sorgente lineare Fosso Ferrata	+	316	12	1380	200	
17	Sorgente Sublacense		320	-	-	30	
18	Gruppo sorgenti Acqua Zolfa, Ponte Arconi e Solfurea	+	320	13.5	800	30	
19	Sorgente Ponte Anticoli	+	322	-	-	20	
20	Sorgente delle Capore		246	12	370	5000	Captata
21	Sorgente delle Vigne		682	-	-	40	
22	Gruppo sorgenti della Signora		742	-	-	80	

Fig. 4.17: Elenco delle principali sorgenti alimentate dall'idrostruttura Sabina meridionale (Capelli et alii, 1987).

Riferibile al drenaggio della grande idrostruttura Sabina meridionale è, sempre in destra idrografica, anche il Torrente Licenza che intercetta, dalle sue origini fino alla confluenza con il Fiume Aniene, la circolazione dell'acquifero basale con una portata complessiva di circa 150 L/s (Capelli et alii, 1987; Boni et alii, 1988; Capelli et alii, 2012). Nella ricostruzione fatta da Capelli et alii (1987) sulle unità idrogeologiche della grande idrostruttura dei Monti Sabini meridionali, il Torrente Licenza è alimentato dalla

Procedendo verso valle, apporti sorgivi con modestissimi quantitativi (inferiori al centinaio di L/s) sono imputabili ad altri tributari minori: in riva sinistra il Fosso Fiumicino, che trae alimentazione dalla idrostruttura dei Monti Prenestini-Ruffi e, in riva destra, alcuni piccoli corsi d'acqua come il Fosso dei Ronci, che intercettano falde dell'idrostruttura dei Monti Lucretili e Cornicolani (sottounità 2b in Capelli et alii, 1987). Il limite tra l'idrostruttura Sabina e quella dei Monti Lucretili-Cornicolani è sempre di natura tettonica e corre parallelamente al Torrente Licenza e al Fiume Aniene; tale condizione geologico-strutturale, determinata dalla presenza di una anticlinale coricata verso SE, condiziona la circolazione idrica sotterranea riducendo fortemente la possibilità di drenaggio verso Sud e favorendo una direzione di drenaggio verso il recapito principale dell'idrostruttura, rappresentato dalla sorgente Acquoria a Tivoli, con una portata di 0,75 m³/s.

Rispetto al quadro idrogeologico bibliografico fin qui presentato, le indagini realizzate hanno permesso di mettere in evidenza quanto segue:

- il Fosso Bagnatore è caratterizzato da una portata media di magra valutata in 485 L/s presso la sezione AN1, valore confrontabile con quanto indicato da Boni et alii (1988);
- il settore del Fiume Aniene presso la confluenza con il Fosso della Scarpa rappresenta il recapito di una circolazione idrica sotterranea che presenta volumi di portate erogate differenti rispetto a quelle attese dalla ricostruzione su base bibliografica. Infatti, dalle misure realizzate presso le sezioni AN2, AN3 ed AN4 risulta complessivamente una portata media erogata di oltre 1500 L/s, di cui quasi 220 L/s sono riferibili al solo Fosso della Scarpa, in cui confluisce il Torrente Ferrata. Il valore di portata riferito a quest'ultimo gruppo sorgivo è in accordo con i 200 L/s indicati in letteratura per la sorgente Lineare del torrente Ferrata (Tabella 4.5) Durante i rilievi condotti, tuttavia, l'alveo del Torrente Ferrata e quello del Fosso della Scarpa sono risultati essere sempre asciutti nel settore a monte del viadotto autostradale, con un drenaggio in alveo che avveniva nel solo Fosso della Scarpa nella zona in prossimità della S.S. Tiburtina Valeria. Il drenaggio superficiale della falda regionale avviene quindi a quota inferiore ai 320 metri s.l.m.;

Nome sorgenti	Capelli et alii (1987)		Boni et alii (1988)		Capelli et alii (2012)		Indagini Sapienza 2021	
	Portata media (L/s)	N° rif bibliografico	Portata media (L/s)	N° rif bibliografico	Portata media (L/s)	N° rif bibliografico	Portata media (L/s)	N° rif bibliografico
Gruppo Morgia Rossa, Osteria, Ferrata e Acetosa	100	15	100	54	100	193	-	
Lineare Torrente Ferrata	200	16	200	53	200	124	220	AN3
Sublacense	30	17	30	52	-		-	
Gruppo Acqua Zolfa, Ponte Arconi e Solfurea	30	18	-		-		-	
Gruppo Osteria della Spiaggia	-		-		200	121	-	
Lineare Aniene tra quota 320 e 260	2000	11	2000	61	2500	14	-	
Lineare Aniene fino a quota 308	-		-		-		1325	AN4 - AN2
	2360		2330		3000		1545	

Tabella 4.5: Confronto tra i dati bibliografici e quelli ottenuti nel presente studio relativi alle sorgenti della zona di confluenza del Fosso della Scarpa nel Fiume Aniene.

- il contributo sorgivo misurato come differenza tra le sezioni AN4 ed AN2, escludendo quello del Fosso della Scarpa misurato alla sezione AN3, è mediamente di 1325 L/s. A causa delle difficoltà logistiche nell'individuare possibili punti di misura intermedi tra l'ubicazione delle sezioni AN2 ed AN4, la quota superiore di inizio del drenaggio in alveo non è facilmente identificabile, seppure sia possibile ipotizzare che cominci in prossimità dei primi affioramenti del complesso delle calcareniti.

Il limite inferiore del drenaggio, invece, risulta essere ubicato in corrispondenza della sezione AN4: poco a monte il Fiume Aniene riceve l'ulteriore contributo da una serie di piccoli affluenti ubicati tutti in riva destra tra la confluenza del Fosso della Scarpa e la sezione AN4, la cui origine potrebbe essere legata ai gruppi sorgivi Osteria della Spiaggia e Acqua Zolfa, Ponte Arconi e Solfurea;

4.2.4 Analisi idrogeologica quantitativa – Misurazione e ricostruzione piezometrica

Durante la campagna di indagine geognostica sono stati realizzati n. 5 piezometri di monitoraggio (Figura 4.19), necessari per la ricostruzione delle superfici piezometriche delle falde ospitate dagli acquiferi, al fine di valutare in maniera corretta la possibilità di una loro interazione con i tracciati acquedottistici. Il monitoraggio piezometrico è stato effettuato su base mensile, svoltesi in parallelo allo sviluppo delle indagini geognostiche, a partire dal mese di agosto 2020 fino ad ottobre 2021.

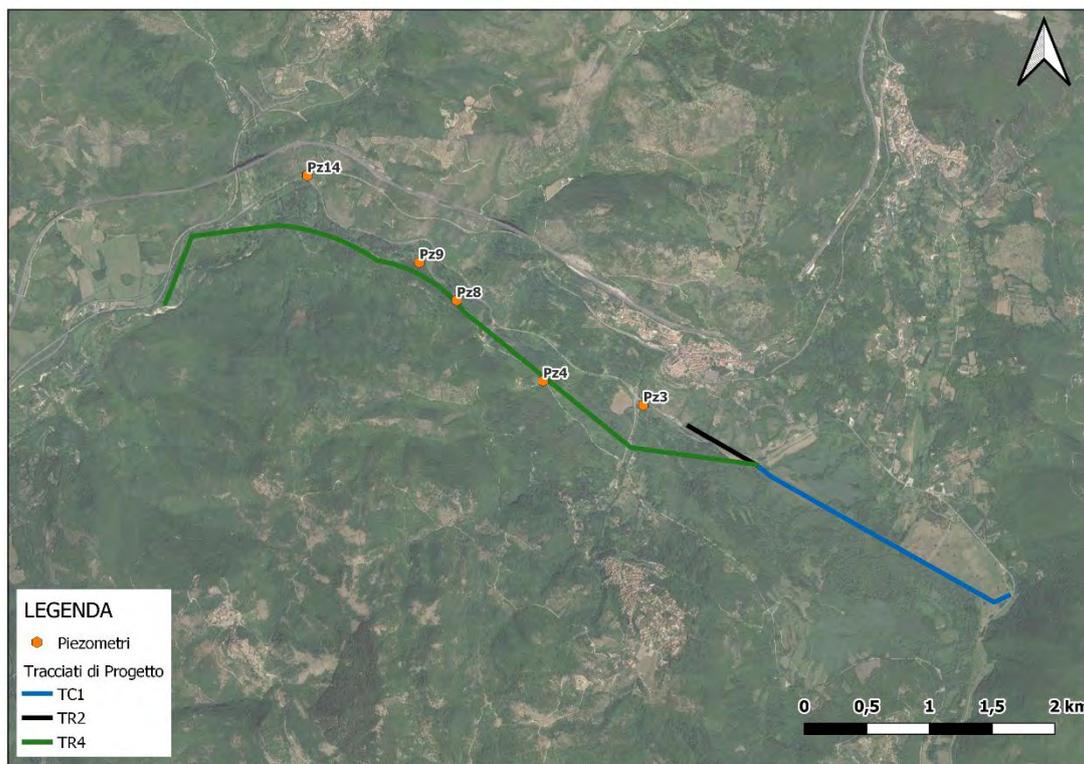


Fig. 4.19: Ubicazione dei piezometri realizzati nell'area di studio.

Sono riassunte di seguito procedure e modalità d'installazione in foro di sondaggio dei tubi piezometrici, accompagnate dai risultati del monitoraggio.

Piezometro PZ3

Realizzato in data 06/08/2021, il piezometro PZ3 è ubicato a valle dell'abitato di Roviano (42°01'20.06"N, 12°59'26.42"E), ad una quota di 321 m s.l.m. Si tratta di un piezometro a tubo aperto in materiale plastico, di diametro pari a 50.80 mm e di lunghezza complessiva pari a 30 metri di cui:

- Tubo cieco: da 0.00 a 2.00 m;
- Tubo cieco: da 2.00 a 30.00 m.

Dal confronto con la stratigrafia di sondaggio corrispondente, il piezometro PZ3 risulta intestato, per i primi 3 metri da fondo foro, in calcareniti molto fratturate, appartenenti al complesso delle calcareniti mioceniche, a loro volta sovrastate da 27 metri del Complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri, presenti in loco come alternanze di argille con limo e limi sabbiosi.

Il piezometro PZ3, selezionato come idoneo al monitoraggio piezometrico, ha restituito un valore di soggiacenza media pari a 2.9 ± 0.4 m da piano campagna, corrispondente ad un livello piezometrico medio di 318.1 ± 0.4 m s.l.m. (Tabella 4.6).

DATA	27/08/2020	07/09/2020	28/01/2021	05/02/2021	08/04/2021	18/06/2021	05/07/2021	06/08/2021	02/09/2021	18/10/2021
Soggiacenza(da p.c.)	-	2.69	-	2.31	-	3.18	-	2.6	3.24	3.27
Livello Piezometrico (m s.l.m.)	-	318.31	-	318.69	-	317.82	-	318.4	317.76	317.73

Tabella 4.6: Valori di soggiacenza e livello piezometrico riferiti al piezometro 3.

Piezometro PZ4

Realizzato in data 27/10/2020, il piezometro PZ4 è ubicato a SW dell'abitato di Roviano ($42^{\circ}01'25.72''N$, $12^{\circ}58'51.42''E$), ad una quota di 323 m s.l.m. Si tratta di un piezometro a tubo aperto in materiale plastico, di diametro pari a 76.2 mm e di lunghezza complessiva pari a 38 metri di cui:

- Tubo cieco: da 0.00 a 3.00 m;
- Tubo filtro: da 3.00 a 38.00 m.

Dal confronto con la stratigrafia di sondaggio corrispondente, il piezometro PZ4 risulta intestato, per i primi 14 metri da fondo foro, in arenarie da fratturate a mediamente compatte, riconosciute come appartenenti al complesso dell'Unità arenaceo-pelitica, a loro volta sovrastate da 24 metri del complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri, presenti in loco come argille sabbiose e sabbie argillose lungo il tratto filtrante e come brecce calcaree in corrispondenza del tratto, più superficiale, di tubo cieco.

Il piezometro PZ4, ritenuto idoneo al monitoraggio piezometrico, ha restituito un valore di soggiacenza media pari a 5.6 ± 0.13 m da piano campagna, corrispondente ad un livello piezometrico medio di 317.4 ± 0.13 m s.l.m. (Tabella 4.7).

DATA	27/08/2020	07/09/2020	28/01/2021	05/02/2021	08/04/2021	18/06/2021	05/07/2021	06/08/2021	02/09/2021	18/10/2021
Soggiacenza(da p.c.)	-	-	5.9	5.65	-	5.48	-	5.6	5.56	5.56
Livello Piezometrico (m s.l.m.)	-	-	317.1	317.35	-	317.52	-	317.4	317.44	317.44

Tabella 4.7: Valori di soggiacenza e livello piezometrico riferiti al piezometro 4.

Piezometro PZ8

Realizzato in data 06/11/2020, il piezometro PZ8 è ubicato poco più ad Ovest della traversa di Roviano (42°01'46.23"N, 12°58'20.85"E), ad una quota di 318 m s.l.m. Si tratta di un piezometro a tubo aperto in materiale plastico, di diametro pari a 76.2 mm e di lunghezza complessiva pari a 35 metri di cui:

- Tubo cieco: da 0.00 a 3.00 m;
- Tubo filtro: da 3.00 a 35.00 m.

Dal confronto con la stratigrafia di sondaggio corrispondente, il piezometro PZ8 risulta intestato, per i primi 12 metri da fondo foro in calcari fratturati e sabbie calcaree sciolte, travertinose, riconosciute come parte del complesso dell'Unità spongolitica marnosa, a loro volta sovrastate da 23 metri del complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri, presenti in loco come brecce calcaree e limi argillosi.

Il piezometro PZ8, giudicato idoneo al monitoraggio piezometrico, ha restituito un valore di soggiacenza media pari a 4.5 ± 1.0 m da piano campagna, corrispondente ad un livello piezometrico medio di 313.5 ± 1.0 m s.l.m. (Tabella 4.8)

DATA	27/08/2020	07/09/2020	28/01/2021	05/02/2021	08/04/2021	18/06/2021	05/07/2021	06/08/2021	02/09/2021	18/10/2021
Soggiacenza(da p.c.)	-	-	2.9	6.3	-	4.36	-	4.48	4.49	4.43
Livello Piezometrico (m s.l.m.)	-	-	315.1	311.7	-	313.64	-	313.52	313.51	313.57

Tabella 4.8: Valori di soggiacenza e livello piezometrico riferiti al piezometro 8.

Piezometro PZ9

Realizzato in data 01/07/2021, il piezometro PZ9 è ubicato a SE dell'abitato di Cineto Romano (42°01'55.9"N, 12°58'07.5"E), ad una quota di 315.5 m s.l.m. Si tratta di un piezometro a tubo aperto in materiale plastico, di lunghezza complessiva pari a 55 metri di cui:

- Tubo cieco: da 0.00 a 6.00 m;
- Tubo filtro: da 6.00 a 55.00 m.

Dal confronto con la stratigrafia di sondaggio corrispondente, il piezometro PZ9 risulta intestato, per i primi 7 metri da fondo foro, in calcari grigi con vene di calcite, caratterizzati da uno stato medio di fratturazione, riconosciuti come parte del complesso delle Scaglie marnose-argillose, a loro volta sovrastati da 48 metri del complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri, in particolare sabbie limose in profondità e ghiaie in matrice sabbiosa verso la superficie.

Il piezometro PZ9, selezionato come idoneo al monitoraggio piezometrico, ha restituito un valore di soggiacenza media pari a 3.6 ± 0.2 m da piano campagna, corrispondente ad un livello piezometrico medio di 311.9 ± 0.2 m s.l.m. (Tabella 4.9).

DATA	27/08/2020	07/09/2020	28/01/2021	05/02/2021	08/04/2021	18/06/2021	05/07/2021	06/08/2021	02/09/2021	18/10/2021
Soggiacenza(da p.c.)	-	-	-	-	-	-	3.35	3.65	3.71	3.83
Livello Piezometrico (m s.l.m.)	-	-	-	-	-	-	312.15	311.85	311.79	311.67

Tabella 4.9: Valori di soggiacenza e livello piezometrico riferiti al piezometro 9.

Piezometro PZ14

Realizzato in data 08/08//2020, il piezometro PZ14 è ubicato a Sud dell'abitato di Cineto Romano ($42^{\circ}2'17.90''N$, $12^{\circ}57'27.88''E$), ad una quota di 3123 m s.l.m. Si tratta di un piezometro a tubo aperto in materiale plastico, di lunghezza complessiva pari a 50 metri di cui:

- Tubo cieco: da 0.00 a 2.00 m;
- Tubo filtro: da 2.00 a 50.00 m.

Dal confronto con la stratigrafia di sondaggio corrispondente, il piezometro PZ14 risulta intestato, per i primi 20 metri da fondo foro, in calcari biancastri sottilmente stratificati e fratturati, riconosciuti come parte del complesso delle Scaglie marnose-argillose, a loro volta sovrastati da 30 metri del complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri, presenti in loco prevalentemente come sabbie limoso-ghialose poco addensate e ghiaie sabbiose mediamente addensate.

Il piezometro PZ14 è risultato idoneo al monitoraggio piezometrico ed ha restituito un valore di soggiacenza media pari a 7.4 ± 0.8 m da piano campagna, corrispondente ad un livello piezometrico medio di 315.6 ± 0.8 m s.l.m. (Tabella 4.10).

RELAZIONE GEOLOGICA

DATA	27/08/2020	07/09/2020	28/01/2021	05/02/2021	08/04/2021	18/06/2021	05/07/2021	06/08/2021	02/09/2021	18/10/2021
Soggiacenza(da p.c.)	-	8.6	-	8.38	7.2	6.55	-	6.67	-	6.87
Livello Piezometrico (m s.l.m.)	-	314.4	-	314.62	315.8	316.45	-	316.33	-	316.13

Tabella 4.10: Valori di soggiacenza e livello piezometrico riferiti al piezometro 14.

Il piezometro PZ32 è stato ritenuto idoneo al monitoraggio piezometrico ed ha restituito un valore di soggiacenza media pari a 3.1 ± 0.2 m da piano campagna, corrispondente ad un livello piezometrico medio di 269.9 ± 0.2 m s.l.m. (Tabella 4.13).

DATA	27/08/2020	07/09/2020	28/01/2021	05/02/2021	08/04/2021	18/06/2021	05/07/2021	06/08/2021	02/09/2021	18/10/2021
Soggiacenza(da p.c.)	-	-	-	-	-	-	3.1	2.85	3.2	3.3
Livello Piezometrico (m s.l.m.)	-	-	-	-	-	-	269.9	270.15	269.8	269.7

Tabella 4.13: Valori di soggiacenza e livello piezometrico riferiti al piezometro 32.

I piezometri analizzati (PZ3, PZ4, PZ8, PZ9 e PZ14) risultano tutti ubicati nel settore tra la piana di Mola di Regno e la confluenza del Fosso della Scarpa nel Fiume Aniene (Figura 4.20) dove affiora il complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri.

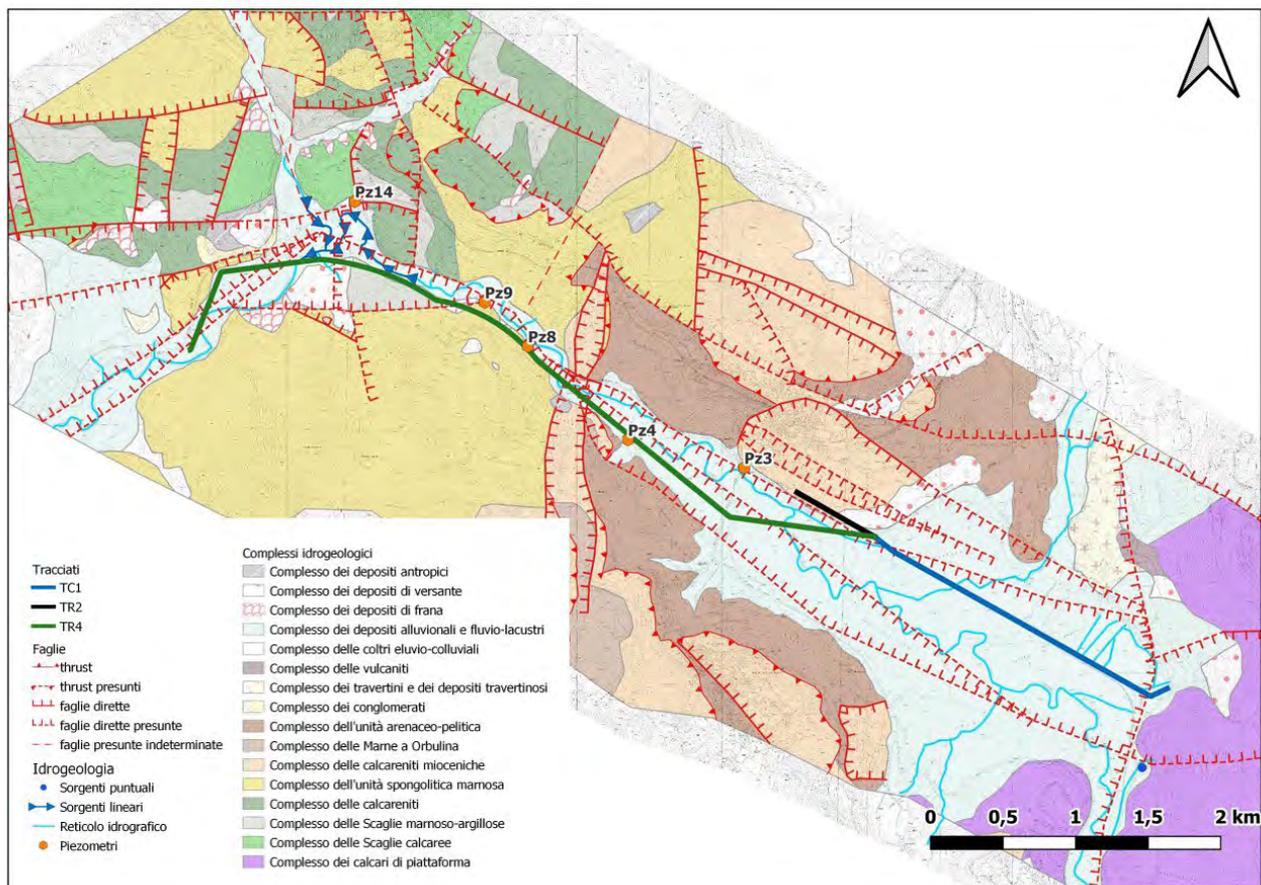


Fig. 4.20: Ubicazione dei piezometri 3, 4, 8, 9 e 14.

L'analisi delle variazioni del livello della superficie piezometrica misurato per ogni singolo piezometro nel periodo Settembre 2020 – Ottobre 2021 (Figura 4.21) indica, per misure eseguite contemporaneamente, che mentre nei primi quattro la quota relativa diminuisce spostandosi verso valle, nel piezometro PZ14 la falda risulta stazionare ad una quota maggiore rispetto ai due ubicati a monte (piezometri PZ8 e PZ9); ciò evidenzia che si possano riferire ad acquiferi differenti, ipotesi che trova conferma anche nella differente conducibilità elettrica misurata all'interno dei piezometri. In particolare, nei piezometri PZ3, PZ4, PZ8 e PZ9 la quota piezometrica può essere ricondotta alla falda regionale dei Monti Simbruini (compresa tra 319 e 311 metri s.l.m.) che in questo settore della valle è in continuità idraulica con i depositi alluvionali permeabili, mentre nel piezometro PZ14 gli stessi depositi alluvionali appaiono in continuità idraulica con la circolazione idrica della falda regionale dei Monti Sabini meridionali (la cui quota è compresa tra 314 e 317 metri s.l.m.).

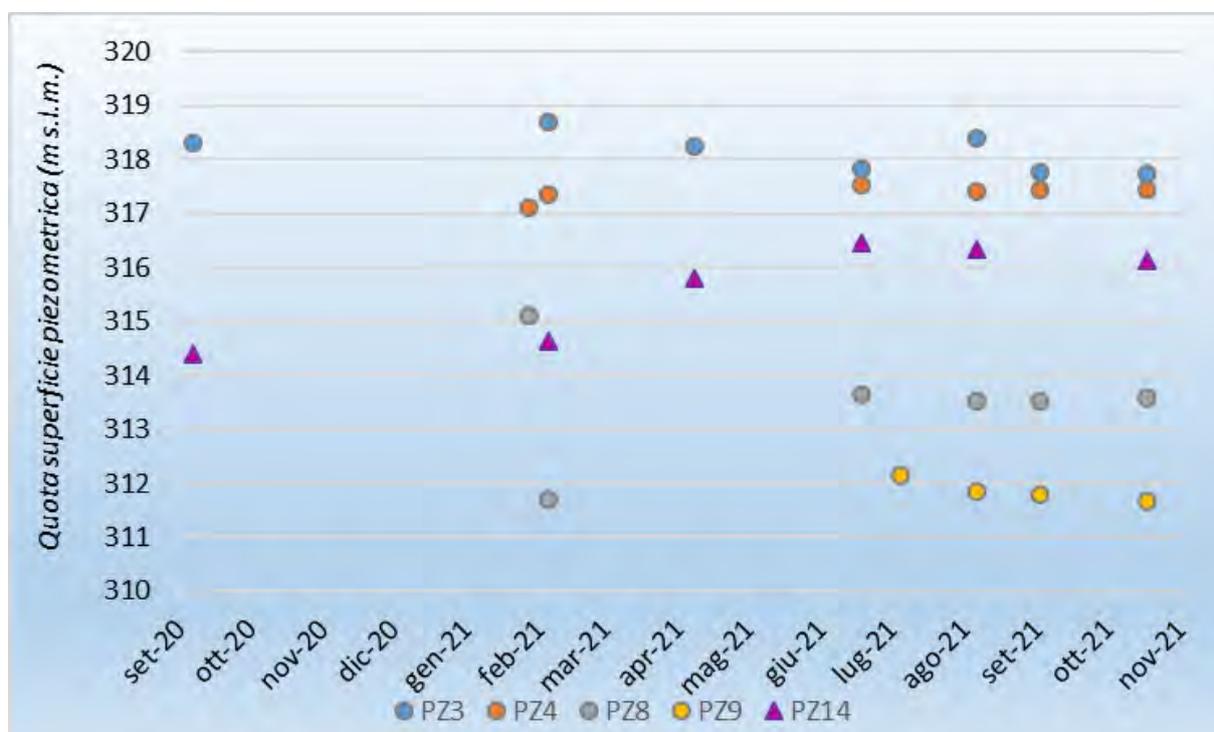


Fig. 4.21: Andamento della superficie piezometrica misurata nei piezometri 3, 4, 8, 9 e 14 tra Settembre 2020 ed Ottobre 2021.

I dati relativi al monitoraggio piezometrico realizzato ed attuato per i piezometri negli ultimi mesi sono stati utilizzati per realizzare 2 mappe piezometriche a scala locale, di seguito denominate:

- 1) "Mola di Regno";
- 2) "Valle Stretta";

Per la caratterizzazione idrogeologica di progetto, al fine di acquisire delle piezometrie rappresentative dell'andamento e stazionamento medio delle falde acquifere, sono stati utilizzati anche i dati relativi ad indagini pregresse ACEA per le quali era stato fornito un valore relativo alla quota della falda e le quote di punti di emergenza della falda (sorgenti) rinvenute durante i sopralluoghi realizzati.

Di seguito vengono discusse le informazioni relative ai dati con cui sono state realizzate, l'attendibilità di ciascuna ricostruzione piezometrica e la probabilità di interazione dei traccianti con la falda.

1) Piezometria Mola di Regno

La piezometria relativa all'area di Mola di Regno è stata realizzata sulla base di n. 10 punti per i quali è stato possibile individuare un valore medio della quota della falda.

I punti utilizzati per effettuare l'interpolazione e ricavare le quote della superficie piezometrica corrispondono a:

- 4 Piezometri realizzati per i quali è stato considerato un valore medio della falda (S3, S4, S8, S9);
- 3 Sondaggi realizzati dei quali è stata ricavata l'ubicazione e di cui è stata ipotizzata la quota media della falda sulla base di informazioni ricavate da indagini condotte nelle aree prossimali (S1, S2 e S6);
- 3 Piezometri con dato acquisito da precedenti indagini geognostiche ACEA.

La piezometria è stata interpolata utilizzando come confine il limite dei depositi alluvionali della Piana di Mola di Regno e della valle del Fiume Aniene. Il limite occidentale di tale area è stato definito su base geologico-stratigrafica e dell'interpretazione dei dati idrochimici, che hanno portato ad individuare un limite di flusso non costituito da un limite stratigrafico o tettonico, ubicato trasversalmente alla valle alluvionale, in corrispondenza del passaggio litologico tra il complesso dell'Unità Spongolitica marnosa e quello delle calcareniti. Inoltre, l'analisi qualitativa delle acque sotterranee ha evidenziato che le acque campionate presso il piezometro S9 hanno affinità idrochimiche con quelle emergenti nel settore a monte piuttosto che quelle

dell'area denominata Valle Stretta, le quali presentano una maggiore mineralizzazione e differenti parametri chimico-fisici. La piezometria così ottenuta (Figura 4.24) delinea un drenaggio da SE verso NW, in direzione della valle alluvionale del Fiume Aniene; la falda nel complesso alluvionale, che risulta in continuità idraulica con la falda regionale dei Monti Simbruini, raggiunge le quote maggiori (circa 327 metri s.l.m.) in prossimità della zona di emergenza "Le Serene".

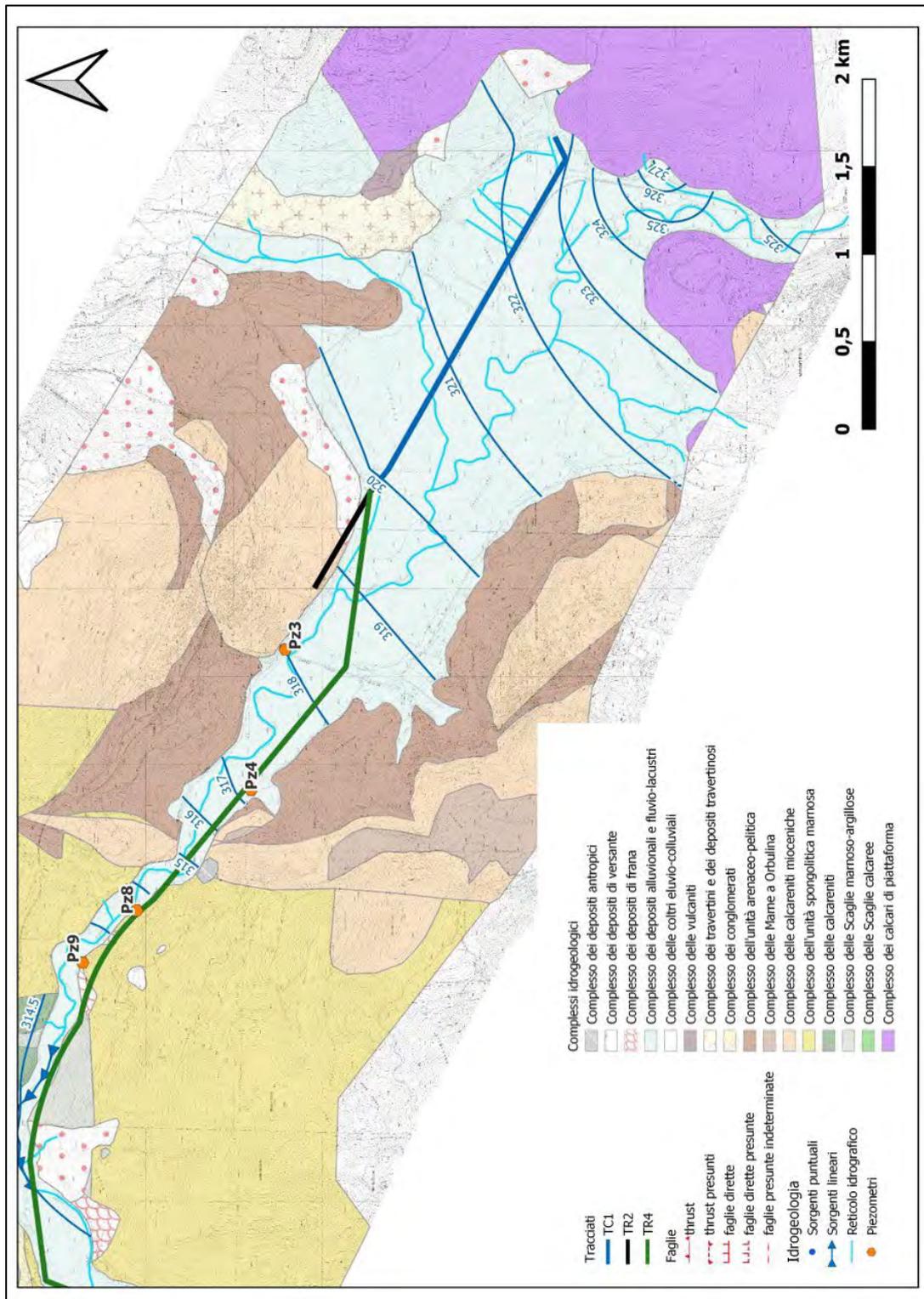


Fig. 4.24: Piezometria dell'area "Mola di Regno"

ATTENDIBILITA' DELLA RICOSTRUZIONE PIEZOMETRICA: Buona

PROBABILITA' DI INTERAZIONE DELL'OPERA CON LA FALDA: Alta probabilità di interazione dell'opera con la falda regionale.

2) Piezometria Valle Stretta

La piezometria relativa all'area denominata "Valle Stretta", corrispondente al settore in cui il Fiume Aniene cambia direzione di scorrimento e riceve gli apporti del Fosso della Scarpa, è stata realizzata sulla base di n. 5 punti per i quali è stato possibile individuare un valore medio della quota della falda.

I punti utilizzati per effettuare l'interpolazione e ricavare le quote della superficie piezometrica corrispondono a:

- 1 Piezometro realizzato per il quale è stato considerato un valore medio della falda (S14);
- 2 Sondaggi dei quali è stata reperita l'ubicazione e di cui è stata ipotizzata la quota media della falda sulla base di informazioni ricavate da indagini condotte nelle aree prossimali (S12, S13);
- 2 Punti di emergenza della falda, in tal caso la quota del piano campagna delle polle sorgive rinvenute durante i rilievi idrogeologici (SO1, SO2).

La piezometria è stata interpolata utilizzando come confine il limite dei depositi alluvionali della valle del Fiume Aniene e del Fosso della Scarpa. Il limite settentrionale coinvolge anche i complessi delle Scaglie calcaree e delle calcareniti, che risultano in continuità idraulica con tali depositi, avendo una buona potenzialità acquifera. Il limite occidentale di tale area, tracciato trasversalmente alla valle alluvionale, è ipotetico, ovvero non è stato determinato un elemento tettonico o litologico che ne possa confermare l'effettiva presenza. Tuttavia, a supporto di tale ipotesi sono stati presi in considerazione:

- i risultati delle prove di permeabilità realizzate sulle argille rinvenute nel sondaggio S21, che hanno evidenziato per il settore ubicato subito a valle, una diminuzione della permeabilità del complesso dei depositi alluvionali, tale da fargli assumere un ruolo di aquiclude o aquitard nei confronti della circolazione idrica sotterranea;
- i risultati delle misure di portata, che hanno evidenziato tra le sezioni di misura AN4 ed AN5 (ubicata più a valle e fuori carta) l'assenza di incrementi della portata in alveo, significativi dell'assenza di drenaggio da parte del corso d'acqua della falda

sotterranea, diversamente da quanto osservato lungo l'Aniene e nel tratto terminale del Fosso della Scarpa, a monte della sezione di misura AN4;

- i risultati delle analisi idrochimiche condotte sul punto di campionamento 14 (sorgente alla fine della Via della Vecchia Ferrovia), dai quali si evince che le acque che emergono in tale settore non presentano le stesse caratteristiche idrochimiche (come, ad esempio, una maggiore mineralizzazione e la temperatura più elevata rispetto agli altri punti di campionamento), proprie dei punti campionati nel settore centrale (campioni 8-9-10-11-12-13).

La piezometria così ottenuta (Figura 4.25) delinea un drenaggio da N verso S, in direzione della valle alluvionale del Fiume Aniene in prossimità della confluenza del Fosso della Scarpa; la falda nel complesso alluvionale, che risulta in continuità idraulica con la falda regionale dei Monti Sabini meridionali, raggiunge le quote maggiori (circa 316 metri s.l.m.) in prossimità del piezometro 16 e del Fosso della Scarpa a monte della S.S. Tiburtina.

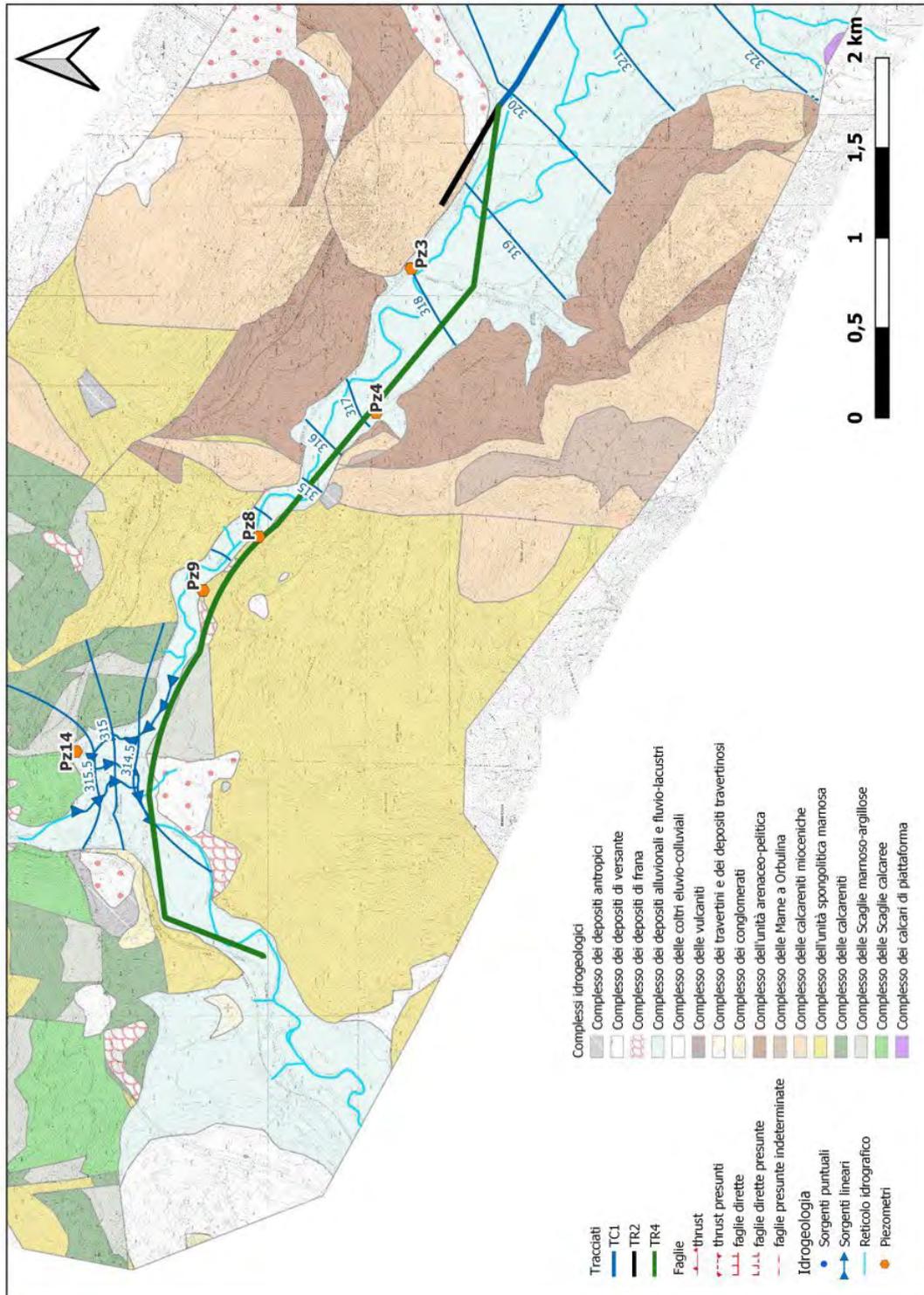


Fig. 4.25: Piezometria dell'area "Valle Stretta".

ATTENDIBILITA' DELLA RICOSTRUZIONE PIEZOMETRICA: Buona

PROBABILITA' DI INTERAZIONE DELL'OPERA CON LA FALDA: Alta probabilità di interazione dell'opera con la falda regionale

4.3 Interazione tracciati di progetto ed acquiferi

L'obiettivo principale della caratterizzazione idrogeologica è stato quello di definire con maggiore dettaglio gli acquiferi, a circolazione regionale e locale, con cui i tracciati di progetto andranno ad interagire. Tramite i risultati delle misure di portata in alveo condotte nel Fiume Aniene e nei suoi principali tributari, del monitoraggio piezometrico e delle analisi idrochimiche realizzate, nonché delle prove di permeabilità fatte realizzare durante l'esecuzione dei sondaggi geognostici, è stato possibile verificare e affinare i modelli di circolazione idrica sotterranea e superficiale della media valle del Fiume Aniene.

In particolare, il monitoraggio piezometrico e le misure di portata in alveo hanno restituito delle indicazioni sui settori di drenaggio delle circolazioni carbonatiche regionali insistenti sul percorso del tracciato, con informazioni puntuali sulle quote delle relative falde che possono essere in continuità idraulica principalmente con i complessi dei depositi alluvionali, dei travertini e dei conglomerati, in funzione delle loro caratteristiche di permeabilità sito-specifiche.

L'analisi idrochimica relativa ai punti campionati (rappresentati da sorgenti, corsi d'acqua ed acque sotterranee prelevate nei piezometri) ha permesso di individuare una facies idrochimica prevalente, ovvero quella bicarbonato-calcica, sebbene con tenori di mineralizzazione differenti in funzione degli acquiferi interessati e delle zone in cui si rinvenivano. L'interazione delle acque sotterranee con i diversi complessi idrogeologici ha determinato variazioni nel chimismo delle acque che non hanno modificato i caratteri generali bicarbonato-calcici, che restano riconoscibili, ma di cui si è tenuto conto nella ricostruzione delle differenti circolazioni.

L'analisi dei risultati delle prove di permeabilità in foro effettuate durante la campagna d'indagine geognostica ha portato alla stima dei range di coefficienti di permeabilità per alcuni complessi idrogeologici. Tali risultati sono stati successivamente confrontati ed integrati con quanto presente in bibliografia, in modo tale da poter associare ad ogni complesso idrogeologico il relativo range di permeabilità.

Di seguito vengono fornite le indicazioni relative all'interferenza tra i tracciati di progetto e la circolazione idrica sotterranea.

Tratto iniziale comune – TC1

Il Nuovo Acquedotto Marcio ha origine presso le sorgenti ubicate in località Mola di Regno. In questo settore la quota per il fondo dello scavo della condotta è piuttosto superficiale, essendo previsto mediamente tra 1,5 e 3 metri di profondità (Figura 4.26).

In base alle informazioni bibliografiche, ai dati relativi ad alcuni sondaggi pregressi realizzati, ad informazioni sulla quota della falda rinvenuta durante l'esecuzione di sondaggi ivi realizzati, alle analisi chimiche delle acque sorgive, si evidenzia come il tratto iniziale dell'acquedotto di progetto si colloca a contatto con la porzione più superficiale, ed a bassa permeabilità dei depositi alluvionali presenti, la cui circolazione idrica è in continuità idraulica con quella relativa all'acquifero regionale dei Monti Simbruini, che nella zona di Mola di Regno ha uno dei suoi recapiti principali.

Infatti, il Complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri che caratterizza la piana di Mola di Regno, nonostante presenti notevoli spessori e variazioni di permeabilità legate alla forte eterogeneità granulometrica e alle marcate eteropie laterali dei depositi, è in continuità idraulica con la falda regionale Simbruina ospitata dal Complesso dei calcari di piattaforma, con livelli di falda prossimi alla superficie topografica (2-3 m da p.c.) e localizzate condizioni di artesianità (Figura 4.27).

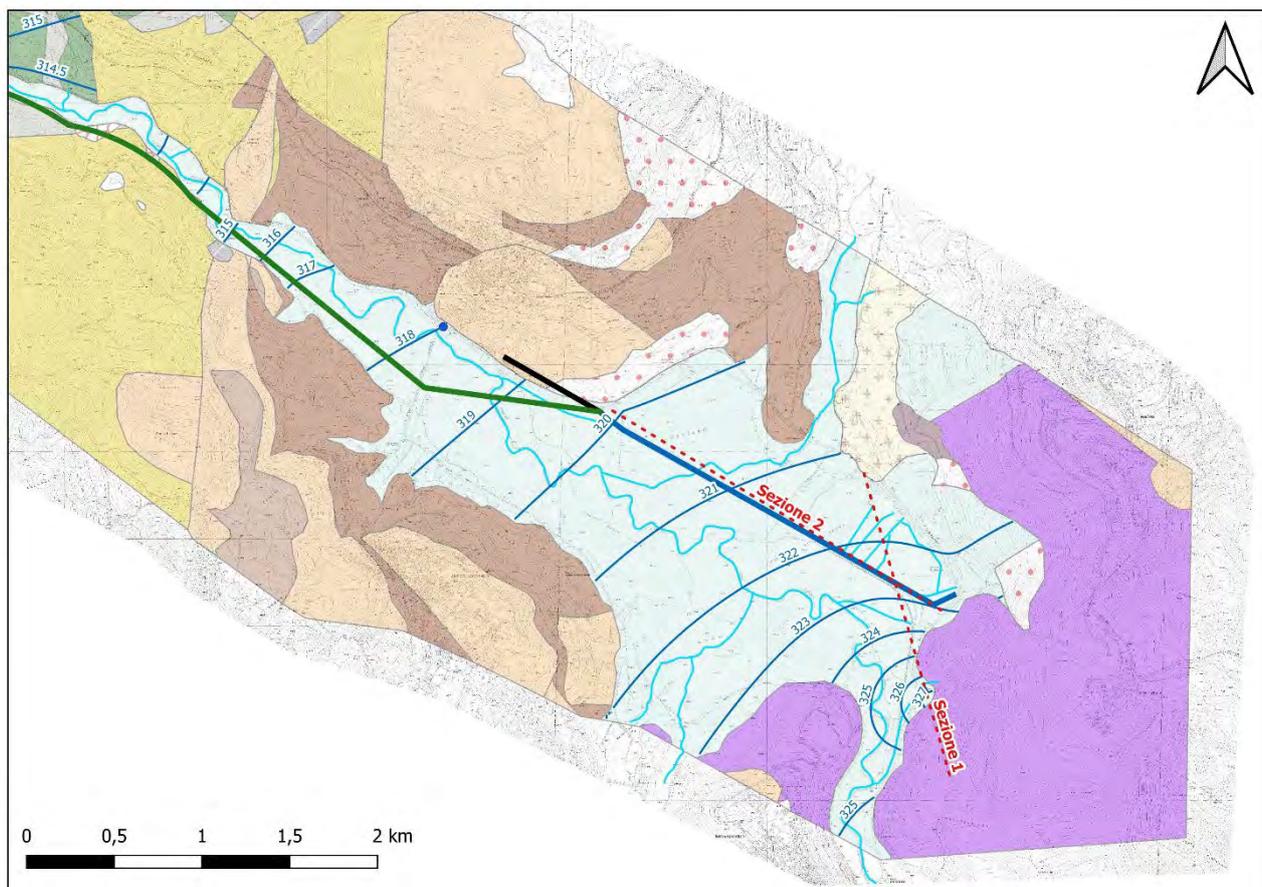
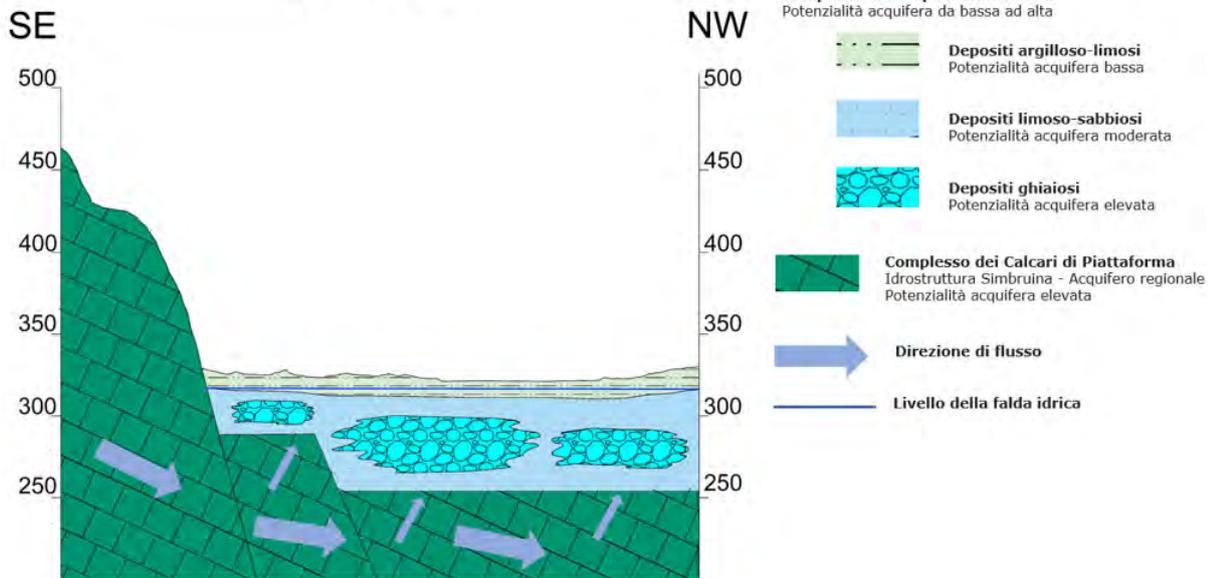


Fig. 4.26: Stralci di carta idrogeologica con indicazione delle sezioni schematiche riportate nelle Fig. 4.27-4.28.

SEZIONE 1



SEZIONE 2

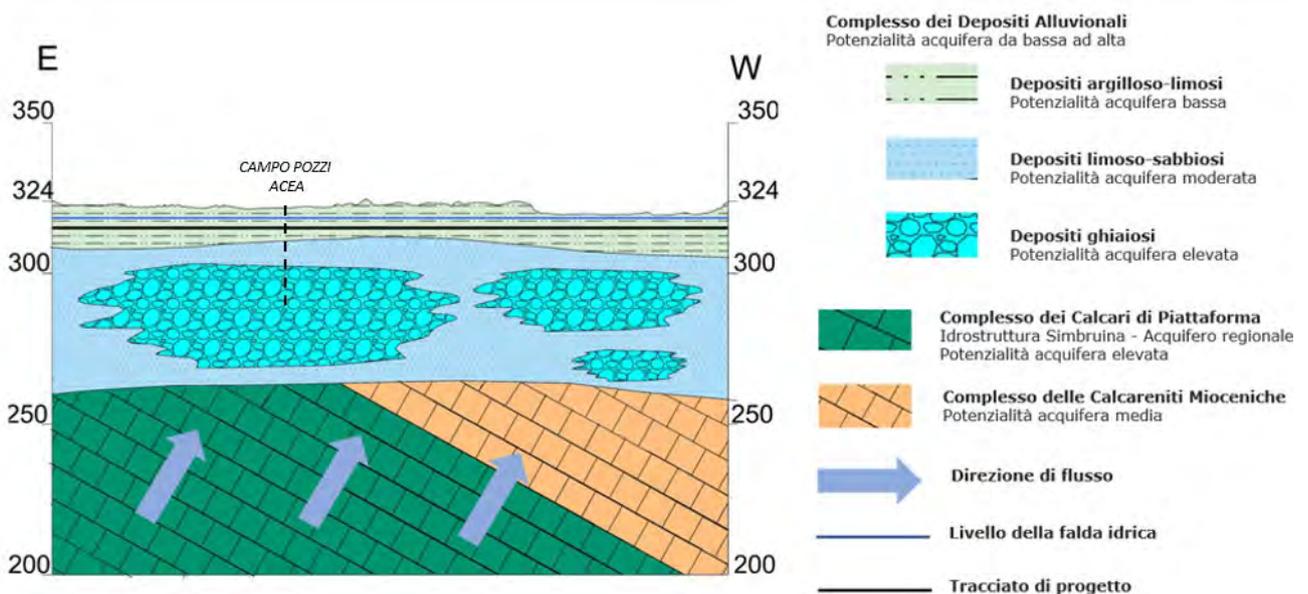


Fig. 4.27: Modello concettuale che rappresenta lo schema di circolazione idrica sotterranea ed i rapporti tra le opere di progetto, i pozzi esistenti e gli acquiferi presenti nell'area di Mola di Regno.

Tracciato TR2

Il tracciato denominato TR2 si sviluppa in destra idrografica del Fiume Aniene nel settore di Ponte Anticoli per una lunghezza di circa 600 m.

In questo settore, le informazioni relative all'assetto idrogeologico sono state desunte dalle misure di portata, dai rilievi (condotti nei piezometri PZ3, PZ4, PZ8, PZ9 e PZ14) e dalle ricostruzioni piezometriche, oltre che dall'analisi chimica effettuata sulle acque campionate.

Nel tratto iniziale, fino al settore ubicato a valle della Traversa di Roviano, le ricostruzioni suggeriscono l'interazione tra il tracciato con la falda alluvionale, la quale si trova in continuità idraulica con la falda dell'idrostruttura dei Monti Simbruini, esclusivamente laddove vengono intercettati i depositi ad esso riconducibili.

Tale interazione è prettamente locale ed è relativa alla presenza dei depositi alluvionali e alla loro relazione con il bedrock. Tuttavia, mediante la ricostruzione della superficie piezometrica rinvenuta all'interno dei piezometri, localizzati sia in destra che in sinistra idrografica, è stato possibile indicare una quota della falda rinvenuta all'interno dei depositi alluvionali e intercettata con il tracciato TR2, variabile da circa 320 metri s.l.m. (in prossimità del sondaggio S2) a quasi 316 metri s.l.m. (presso la traversa di Roviano). In questo settore del tracciato, a partire dal manufatto nodo A, il battente d'acqua che si ipotizza venga rinvenuto nei depositi alluvionali durante lo scavo è nell'ordine di una decina di metri rispetto alla quota di fondo scavo.

Nel settore a valle della traversa idroelettrica di Roviano e del piezometro PZ9, il tracciato attraversa il complesso idrogeologico delle calcareniti, caratterizzato da una potenzialità acquifera media, entrando nel dominio geologico umbro-sabino e nell'idrostruttura dei Monti Sabini meridionali. Presso la confluenza del Fosso della Scarpa nel Fiume Aniene i risultati delle indagini idrogeologiche ed idrochimiche hanno evidenziato l'emergenza di un volume non trascurabile (valutato tramite le misure di portata in alveo in circa 1500 L/s) di acque sotterranee mineralizzate.

In funzione della ricostruzione piezometrica ottenuta, le quote della superficie piezometrica in questo settore, che in alcuni punti è prossima al piano campagna con locali condizioni di artesianità, sono comprese tra circa 314 e 316 metri s.l.m. Ne consegue che è atteso un battente d'acqua di oltre dieci metri, rispetto alla quota di

fondo scavo, nel tratto in cui il tracciato attraverserà il complesso alluvionale permeabile, che risulta in continuità idraulica con i complessi delle Scaglie calcaree e delle calcareniti.

Tracciato TR4

Nei pressi di Ponte Anticoli, al termine del tratto comune iniziale del NAM, ha inizio il tracciato TR4, che segue il corso del Fiume Aniene in riva sinistra, fino alla confluenza del Fosso della Scarpa. In questo punto avviene l'attraversamento del Fiume Aniene e la condotta del TR4 si trasferisce in destra idrografica, pur mantenendosi nella zona della valle alluvionale vicino al corso d'acqua, il quale viene lambito o riattraversato più volte.

In questo primo tratto l'interazione del tracciato con la falda idrica sotterranea all'interno del complesso dei depositi alluvionali e fluvio-lacustri, la quale si trova in continuità idraulica con la circolazione carbonatica regionale dei Monti Simbruini, è stata confermata dai rilievi e dalla ricostruzione piezometrica ottenuta dai dati relativi ai piezometri PZ3, PZ4, PZ8 e PZ9, oltre che dall'analisi chimica effettuata sulle acque campionate. La quota della condotta risulta generalmente più superficiale rispetto al tracciato del TR2, eccezion fatta nel settore immediatamente a valle della traversa idroelettrica di Roviano, dove lo scavo avviene per un breve tratto all'interno della dorsale dei Monti Ruffi; la quota di fondo scavo del tracciato, dopo i primi 400 metri circa, si approfondisce gradualmente ad una quota di quasi 310 metri s.l.m.

In funzione della ricostruzione piezometrica ottenuta, le quote della superficie piezometrica rinvenuta all'interno dei depositi alluvionali, intercettati dal TR4 fino al settore a valle della traversa idroelettrica di Roviano, sono comprese tra circa 320 e 315 metri s.l.m. Ne consegue che è atteso un battente d'acqua di oltre dieci metri, rispetto alla quota di fondo scavo, nel tratto in cui il tracciato attraverserà il complesso alluvionale permeabile.

Immediatamente a monte dell'ubicazione dei sondaggi S12, S13 e PP2, il tracciato inizierà ad interagire con la circolazione idrica sotterranea nei depositi alluvionali, i quali si trovano in continuità idraulica con la falda dei Monti Sabini meridionali. In riva sinistra la circolazione idrica sotterranea è tamponata dal complesso impermeabile delle Scaglie marnoso-argillose.

Le frazioni più argillose svolgono localmente una funzione di acquiclude nei confronti dei complessi calcarei sottostanti. In quest'area, l'esecuzione dei sondaggi sopra menzionati, ha permesso di riscontrare una falda con risalite fino al piano campagna con locali condizioni di artesianità.

I risultati delle indagini idrogeologiche ed idrochimiche realizzate nella zona di confluenza del Fosso della Scarpa nel Fiume Aniene, hanno evidenziato l'emergenza di un volume non trascurabile (valutato tramite le misure di portata in alveo in circa 1500 L/s) di acque sotterranee mineralizzate.

In funzione della ricostruzione piezometrica ottenuta, le quote della falda in questo settore sono comprese tra circa 314 e 316 metri s.l.m. Ne consegue che è atteso un battente d'acqua di un massimo di venti metri, rispetto alla quota di fondo scavo posta a 294-296 m s.l.m.; qui il tracciato attraverserà il complesso alluvionale permeabile.

Come già indicato per il tracciato TR2, l'emergenza di queste acque mineralizzate è limitata ad un settore molto ristretto. Oltre questo settore, inizialmente, il tracciato interferirà con acque sotterranee a minore mineralizzazione, o comunque diluite rispetto a quelle precedenti.

Dalle ricostruzioni eseguite in quest'area, si segnala la presenza di una falda superficiale, riconducibile ai depositi del Fiume Aniene. È stato possibile rinvenire come tale falda presenti una quota massima di 309 m s.l.m.

Sulla base del modello concettuale sopra rappresentato si evidenzia che le opere di progetto interessano la porzione più superficiale, a bassa permeabilità, dell'acquifero alluvionale, che nel tratto TC1 risulta in continuità idraulica con il sottostante acquifero carbonatico dell'idrostruttura Simbruina. Pertanto, la realizzazione del nuovo acquedotto non andrà in alcun modo interferire con i pozzi in esercizio, né potrà alterare lo schema della circolazione idrica sotterranea presente.

Si può affermare che l'opera non avrà interferenze con le attuali dinamiche di circolazione idrica sotterranea. Eventuali perturbazioni locali, peraltro non significative, saranno limitate alle fasi di realizzazione e non interesseranno la fase di esercizio. Si specifica inoltre come la predisposizione di un'opportuna rete di monitoraggio idrogeologico, così come previsto nel Piano Preliminare di Monitoraggio Geotecnico e Strutturale (Elab. A250PDS R019 1) permetterà di minimizzare quanto sopra segnalato.

5. Inquadramento geomorfologico

Nel complesso, l'area interessata dalla *Prima Fase Funzionale* risulta interessata da tre tipologie di pericolosità geomorfologica/geologica, a loro volta ascrivibili a specifiche cause naturali:

- 1) Pericolosità diffusa, essenzialmente connessa alla sismicità locale a cui l'intera area di progetto è esposta.
- 2) Pericolosità locale di tipo areale, essenzialmente connessa a processi di subsidenza, frana ed esondazione.
- 3) Pericolosità puntuale, essenzialmente connessa alla presenza di forme da carsismo ipogeo con possibile evoluzione verticale e formazione di sinkhole.

La prima delle pericolosità sopra elencate è discussa nel seguente "*Capitolo 6 Caratterizzazione sismica dell'area*".

Di seguito vengono invece riportati e discussi gli elementi in merito alle restanti pericolosità, di tipo areale e puntuale.

Le risultanze dell'inquadramento geomorfologico vengono rappresentate graficamente nell'elaborato grafico *A250PDSG0030 "Carta geomorfologica"*.

5.1 Instabilità gravitative

Al fine di valutare le criticità per processi di frana nelle zone in cui la *Prima Fase Funzionale*, è stata verificata la presenza di movimenti franosi già catalogati nel Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) della Regione Lazio, nel database del Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) redatto da APAT (2007) e nella Carta Inventario dei Fenomeni Franosi della Regione Lazio (Prestininzi, 2000).

In Figura 5.1.1 è riportato lo stralcio del Progetto IFFI per l'area interessata dal progetto. Sul versante Nord in prossimità dell'abitato di Anticoli Corrado sono censite alcune frane per colamento lento, queste interessano presumibilmente le coltri superficiali frutto dell'alterazione del substrato (che in questa zona è composto essenzialmente da flysch); nella stessa zona sono presenti anche due frane, di cui una di dimensioni leggermente maggiori, con movimento complesso.



Fig. 5.1.1: Frane IFFI per la zona compresa tra Agosta e Roviano.

Si riportano di seguito gli stralci del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI - Carta Inventario dei Fenomeni Franosi 2002 - Autorità di Bacino del Fiume Tevere e mosaicatura ISPRA 2017) per l'area di interesse. Dall'analisi di questa cartografia si possono dedurre situazioni che, seppur approssimativamente analoghe a quelle riportate nel catalogo IFFI, vanno a modificare geometria, estensione ed a volte tipologia dei corpi di frana.

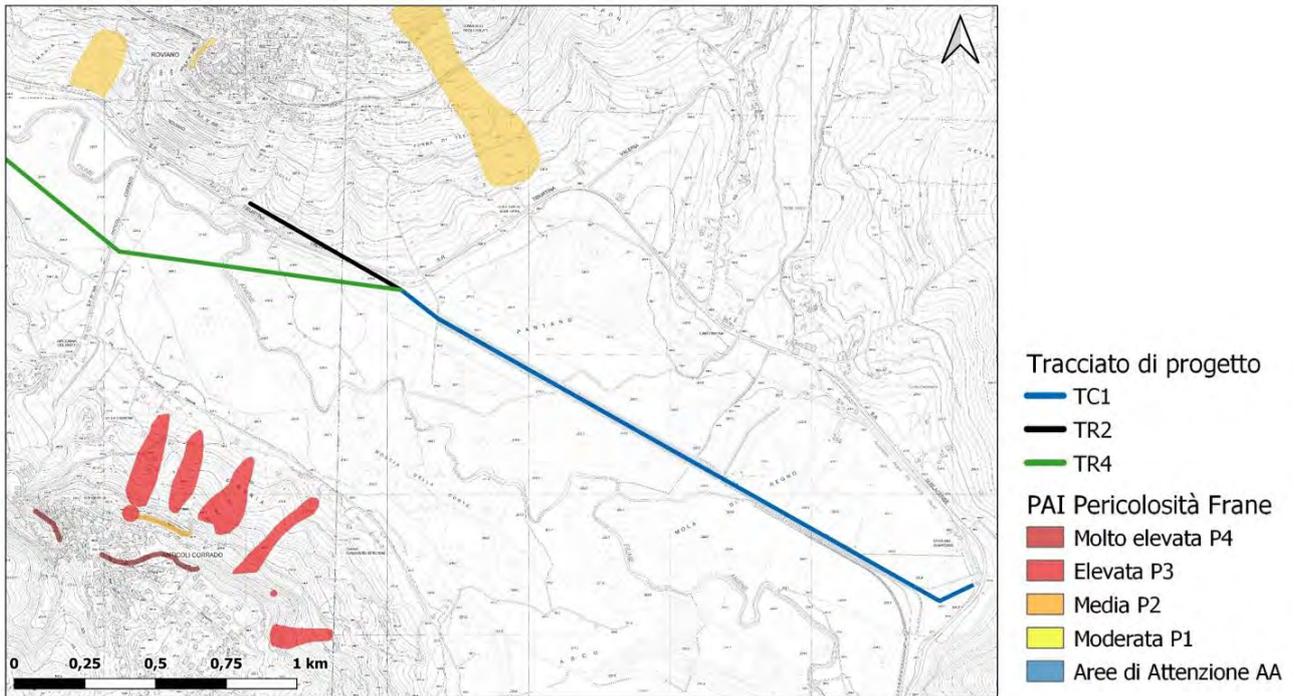


Fig. 5.1.4: Frane PAI pericolosità 2017 per la zona compresa tra Agosta e Roviano.

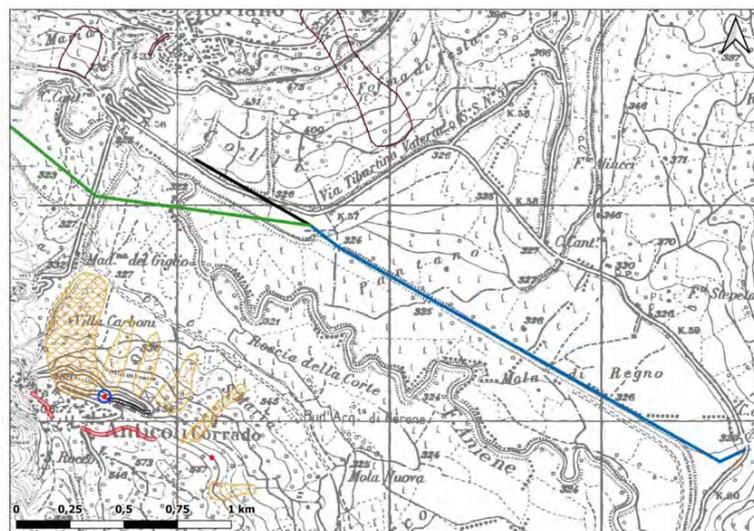


Fig. 5.1.5: Frane PAI 2002 per la zona compresa tra Agosta e Roviano.

Dall'analisi di tutta la cartografia sopra esposta si possono effettuare le seguenti considerazioni:

- È presente un cluster di frane con tipologia complessa e di colamento lento sul versante sotto l'abitato di Anticoli Corrado (Figura 5.1.1; Figura 5.1.4). Data la distanza del tracciato dal versante in frana e data la morfologia caratterizzata da una valle a fondo piatto che si interpone tra la condotta e i corpi franosi, si ritiene che questi non possano generare situazioni di rischio per l'opera.
- La stretta valle che da Roviano si muove in direzione Nord-Ovest presenta esclusivamente 2 frane presunte riportate nella Carta Inventario dei Fenomeni Franosi con pericolosità moderata P1 ma che non sono state identificate nel progetto Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI); essendo in questa zona l'energia del rilievo relativamente alta e gli ammassi rocciosi particolarmente fratturati, l'analisi verrà approfondita in una fase più avanzata dello studio anche mediante la predisposizione di un piano di monitoraggio (Figura 5.1.4).

5.2 Fenomeni di esondazione

Passando alle criticità connesse con i fenomeni di esondazione, si riportano gli stralci del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) prodotto dall'Autorità di Bacino del Fiume Tevere, relative alle fasce fluviali esondabili e le zone a rischio connesse al reticolo principale e la mosaicatura ISPRA 2017 di pericolosità idraulica. La cartografia in esame suddivide il territorio in fasce fluviali.

La fascia A sottintende la zona a cavallo del corso d'acqua principale (in questo caso il Fiume Aniene) potenzialmente soggetta a fenomeni di esondazione con tempi di ritorno brevi (Tr 50 anni). A questa fascia è quindi associata la pericolosità maggiore. Le fasce B e C si riferiscono a tempi di ritorno medi (Tr 200 anni) e lunghi (Tr 500 anni), quindi rispettivamente pericolosità medie e basse.

Dall'analisi di questa cartografia emergono le seguenti situazioni:

- Nel tratto in comune di partenza, più precisamente quello compreso tra Agosta e Roviano, i tracciati di progetto si trovano quasi totalmente in zona P3, quindi a pericolosità elevata, corrispondente alla Fascia A (Figura 5.2.1 e Figura 5.2.2);

- Per tutta la valle che da Roviano ha andamento prima in direzione Nord-Ovest e poi Sud-Ovest, in direzione Vicovaro, il tracciato TR2 si trova in zone limitrofe ma generalmente non comprese nelle aree perimetrare come potenzialmente affette da pericolosità idraulica (si fa eccezione per i due avvicinamenti alla valle alluvionale in corrispondenza di Roviano e del Fosso della Scarpa). Tutt'altra situazione viene invece evidenziata per il tracciato TR4 che, muovendosi principalmente all'interno della valle alluvionale del Fiume Aniene (con numerosi passaggi anche in corrispondenza dell'attuale alveo) viene caratterizzato da numerose intersezioni con aree a pericolosità elevata (P3), corrispondenti alla Fascia A (Figura 5.2.3 e Figura 5.2.4).

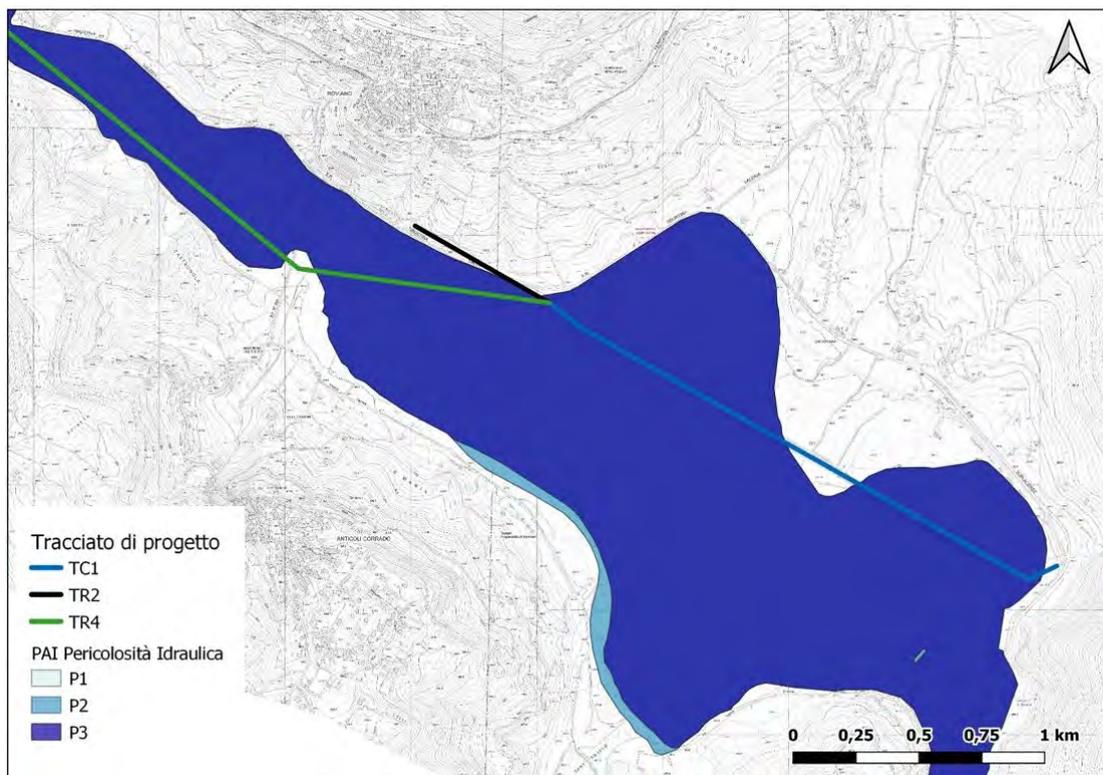


Fig. 5.2.1: PAI pericolosità idraulica mosaicatoria ISPRA 2017 per la zona tra Agosta e Roviano.

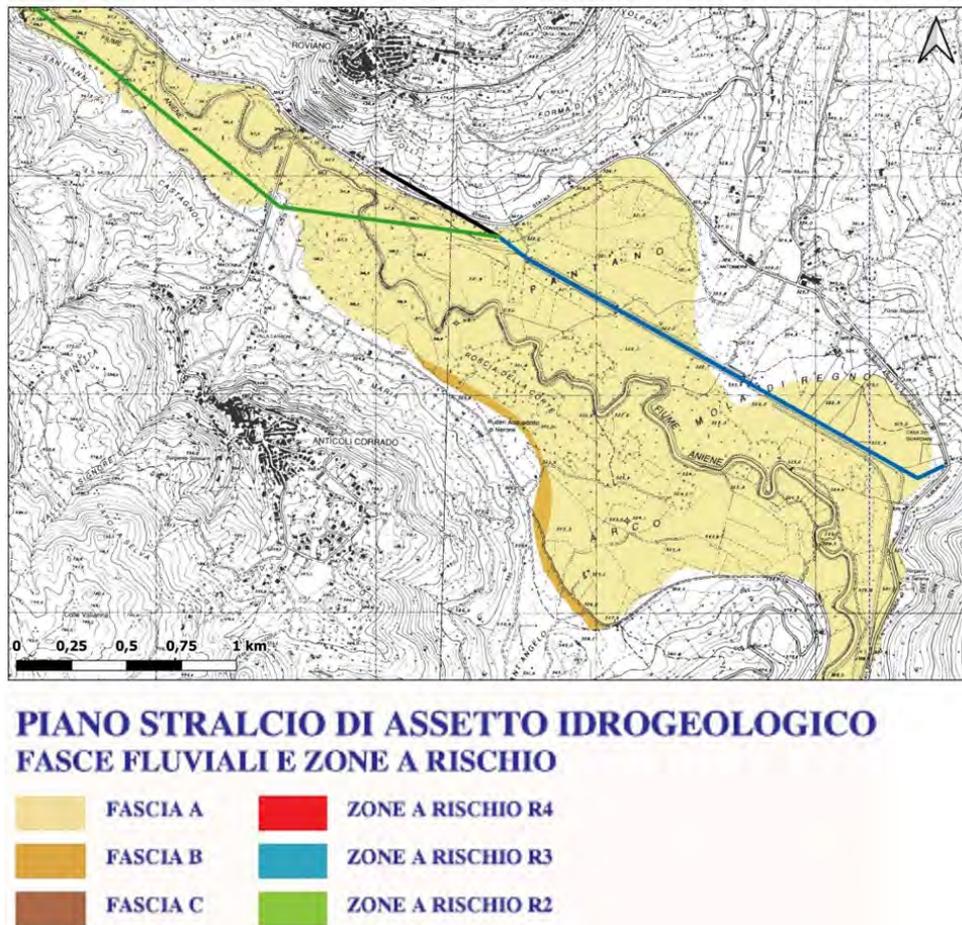


Fig. 5.2.2: Fasce fluviali e zone a rischio connesse al reticolo principale PAI per la zona tra Agosta e Roviano.

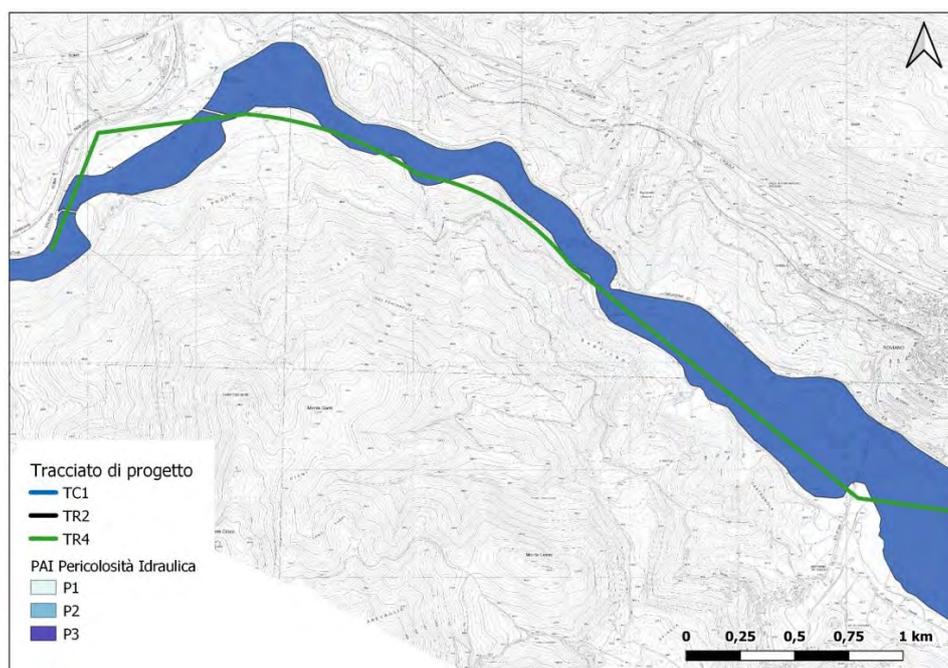


Fig. 5.2.3: PAI pericolosità idraulica mosaicitura ISPRA 2017 per la zona tra Roviano e Mandela.

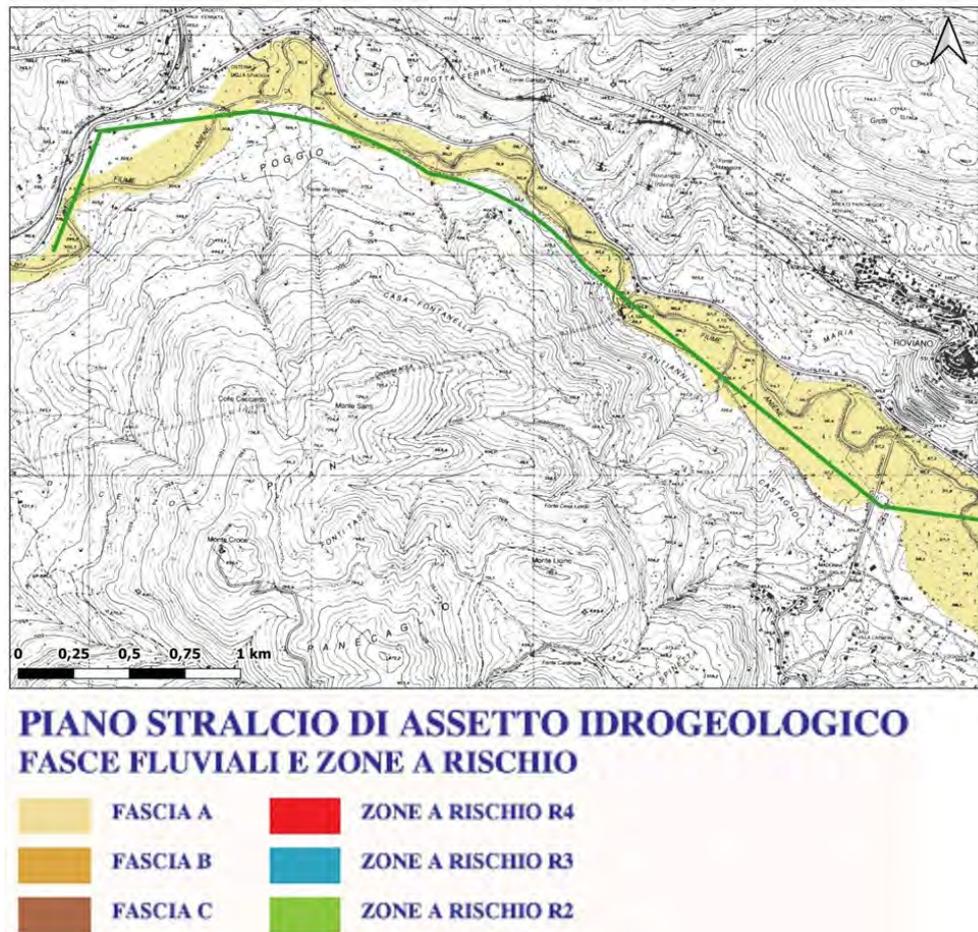


Fig. 5.2.4: Fasce fluviali e zone a rischio connesse al reticolo principale PAI per la zona tra Roviano e Mandela.

5.3 Evidenze di fenomeni di subsidenza

Per una valutazione di massima su vasta scala di dissesti in atto sul territorio di interesse, con particolare riferimento a movimenti di versante e fenomeni di subsidenza, ad integrazione delle osservazioni di sito si è fatto riferimento ai risultati del Piano Straordinario di Telerilevamento (PST) condotto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM). In particolare, grazie al servizio WMS disponibile sul portale cartografico nazionale, sono stati acquisiti i dati derivati dall'analisi interferometrica dei dati SAR satellitari COSMO-SkyMed (copertura 2013 – 2015) ed ENVISAT (copertura 2008 – 2010), che consentono nel loro insieme di visualizzare la componente dei trend deformativi satellitari lungo la linea di vista (LOS – Line Of Sight) su un arco temporale di 5 anni.

Prima di passare ad una breve descrizione delle osservazioni rese possibili dall'analisi di questi dati, è opportuno fare alcune considerazioni:

- I prodotti interferometrici del PST derivano da analisi semi-automatiche su vasta scala e non sono quindi frutto di analisi di dettaglio specifiche.
- I dati forniti dal WMS sono già elaborati con algoritmi proprietari, secondo algoritmi ritenuti più appropriati per la definizione dei processi di interesse.
- Le analisi condotte con tecnica PS (*Persistent Scatterers*) è influenzata dalla presenza di riflettori naturali o artificiali al suolo.

Fatte queste premesse, si illustrano di seguito alcune considerazioni di massima fatte in base all'osservazione dei dati PS.

Di seguito, si riportano i dati interferometrici COSMO-SkyMed (più recenti e con migliore risoluzione geometrica). Nei settori compresi tra Vicovaro ed Agosta (Figura 5.3.2 e 5.3.3) si riescono a distinguere dei cluster in allontanamento e avvicinamento; i dati provenienti dalla geometria ascendente identificano 2 aree in abbassamento, cerchiato in rosso in Figura 5.3.2, che si attestano in zone di versante, il che porta a ritenere che queste possano essere potenzialmente interessate da fenomeni gravitativi, un'altra area si trova invece in corrispondenza del ponte che collega Roviano ad Anticoli Corrado, dove al contrario si ritiene che l'abbassamento possa essere determinato dalla consolidazione dei terreni alluvionali su cui poggia il ponte stesso. Infine, a Sud-Ovest del Fosso della scarpa si identifica un'area in avvicinamento. L'immagine stralcio dell'orbita discendente per le stesse aree, in Figura 5.3.3, va a rimarcare l'abbassamento in corrispondenza del Ponte di Anticoli Corrado e mostra una lieve subsidenza diffusa su tutto il versante nord della Valle dell'Aniene. Il confronto tra le due orbite risulta invece di particolare interesse per il cluster a Sud-Ovest del Fosso della Scarpa: questo, nella geometria ascendente viene associato a spostamenti in sollevamento, mentre nella geometria discendente viene associato ad un'area in abbassamento. Tale divergenza porta a ritenere che la superficie topografia in quel punto possa essere caratterizzata da movimenti di tipo orizzontale (tuttavia le fonti bibliografiche PAI e IFFI non riportano movimenti gravitativi in quest'area). La presenza di pochissimi riflettori ubicati nella Piana di Agosta non permette di analizzare in maniera esaustiva gli spostamenti a cui questa è possibilmente soggetta, tuttavia non si esclude che quest'area possa essere interessata da fenomeni di subsidenza dei depositi alluvionali. L'analisi dei dati interferometrici Envisat, di seguito riportati, non ha invece mostrato alcuna situazione di particolare rilevanza.

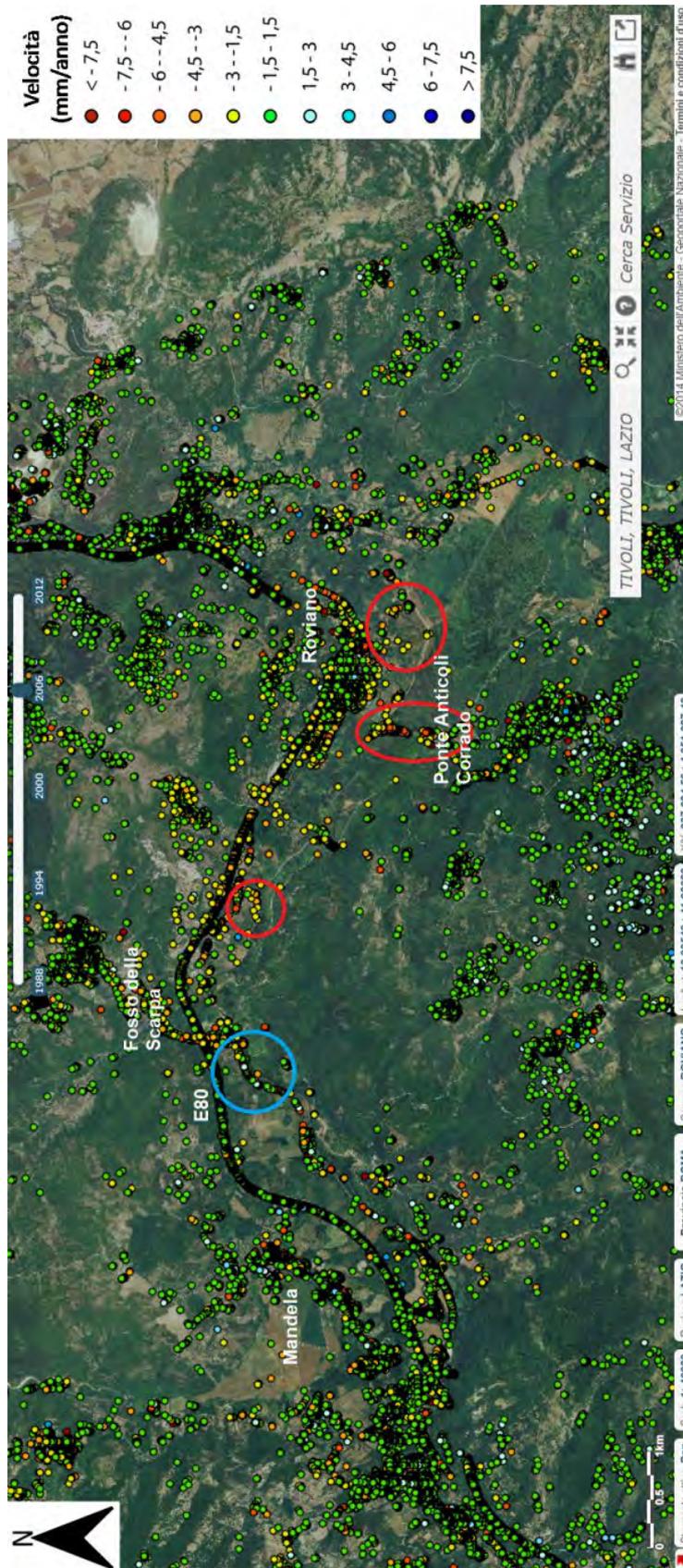


Fig. 5.3.2: Dati COSMO-SkyMed in orbita ascendente per l'area tra Vicovaro e Agosta. Cerchiati in rosso i principali cluster di PS in allontanamento ed in celeste quelli in avvicinamento.

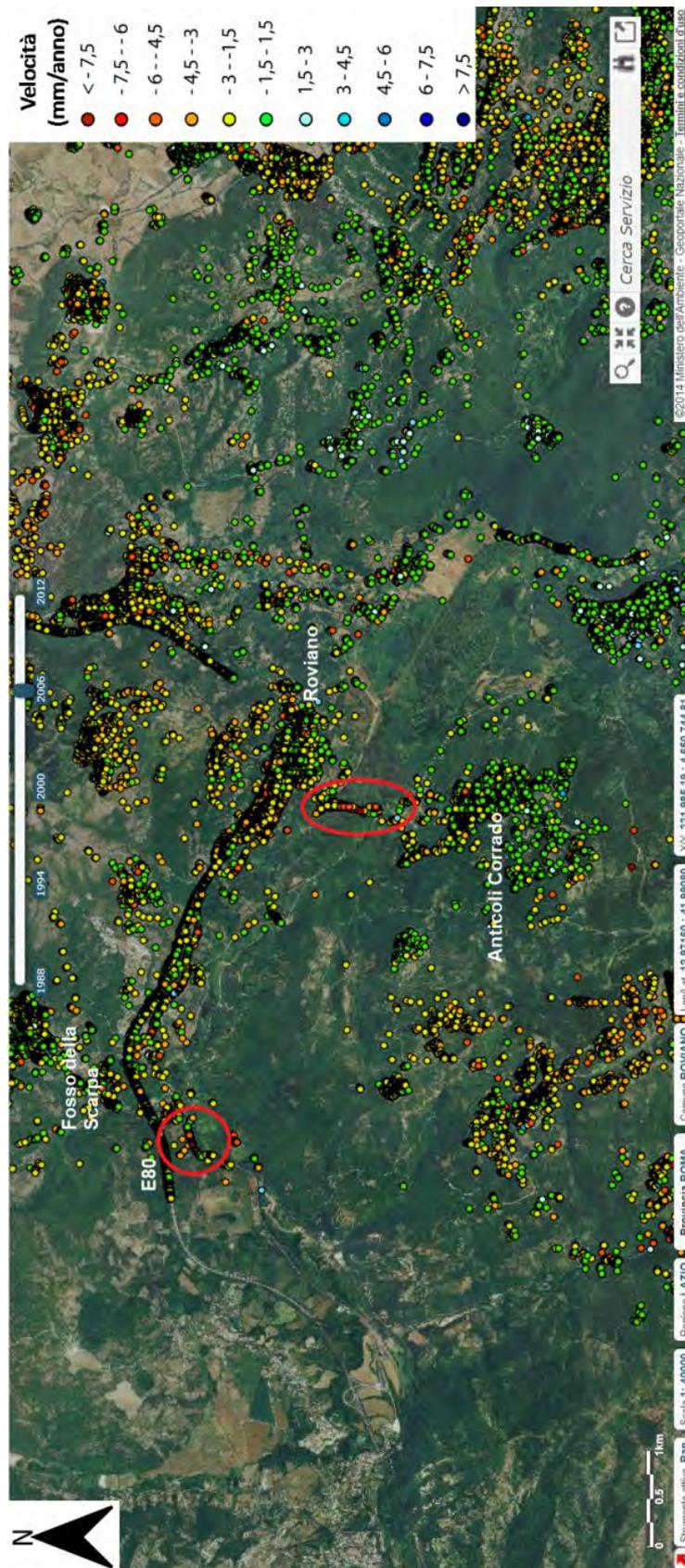


Fig. 5.3.3: Dati COSMO-SkyMed in orbita discendente per l'area tra Vicovaro e Agosta. Cerchiati in rosso i principali cluster di PS in allontanamento.

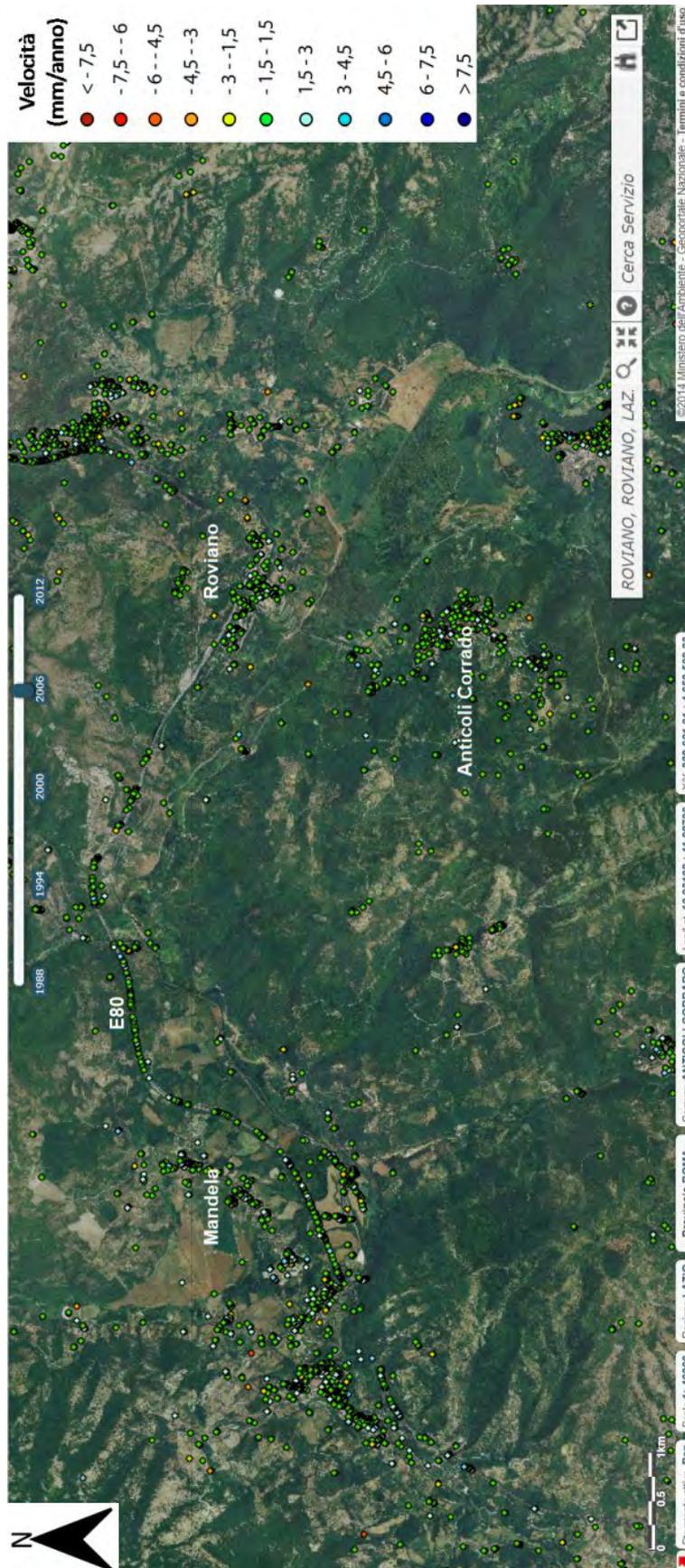


Fig. 5.3.5: Dati Envisat in orbita ascendente per l'area tra Vicovaro e Agosta.



Fig. 5.3.7: Dati Envisat in orbita discendente per l'area tra Vicovaro e Agosta.

5.4 Processi carsici

I fattori di pericolosità geologica di tipo puntuale sono ascrivibili principalmente a fenomeni carsici di sprofondamento (sinkhole) e, più in generale, a tutti quei processi che nel corso del tempo hanno permesso la creazione di cavità ipogee.

A tal proposito, è altresì importante distinguere i fenomeni di sinkhole da quelli di sprofondamenti dolinali, in quanto, mentre le doline s.s. si formano in zone in cui un substrato carsificato è in affioramento o è ricoperto da una sottile coltre di sedimenti, nel caso dei sinkhole propriamente detti, lo spessore delle coperture può essere anche maggiore di 100 m (Nisio & Salvati, 2004). In relazione alla naturale evoluzione dei processi carsici ipogei, le doline si sviluppano dall'alto verso il basso per via di processi puramente carsici. La genesi dei sinkhole presenta, invece, polarità opposta, iniziando con la formazione di una proto-cavità all'interfaccia bedrock-coperture che si propaga verso l'alto per crolli successivi. La propagazione è funzione del meccanismo prevalente (ravelling oppure piping) e delle caratteristiche delle coperture. Il collasso avviene quando lo spessore di terreno tra la cavità e il piano campagna non risulta più in grado di sostenere il carico litostatico, generando le voragini imbutiformi o subcilindriche superficiali (Nisio, 2003).

Le cause principali degli sprofondamenti vanno quindi principalmente ricercate nei processi di soffusione, che si sviluppano per la risalita delle acque attraverso le faglie che dislocano il substrato carbonatico, provocando l'erosione dal basso (piping) dei depositi continentali sovrastanti, cui si aggiungono gli effetti dei processi di dissoluzione legati alla risalita di fluidi mineralizzanti attraverso gli stessi elementi strutturali (Nisio, 2003). Tali processi subirebbero degli incrementi rilevanti in occasione di eventi sismici o di eventi meteorici di notevole intensità, a causa delle variazioni di pressione nelle falde confinate nel substrato carbonatico (Centamore et al., 2004).

Più in generale, i fattori predisponenti da tenere in considerazione per definire un'area come potenzialmente soggetta a sinkholes sono i seguenti:

- lo spessore delle coperture recenti in relazione alla profondità alla quale affiora il substrato carbonatico;
- l'effettiva distribuzione di fenomeni di carsismo ipogeo in relazione al livello di stress, ossia al grado di tettonizzazione;

- le caratteristiche idrogeologiche ed idrodinamiche della falda in relazione ad un possibile circuito carsico;
- la presenza di una falda confinata in relazione all'effetto di sotto-spinta da essa indotta a fronte del carico litostatico totale soprastante;
- l'avvicinarsi del movimento verticale discendente delle acque con un flusso ascendente, nei casi in cui l'acquifero carbonatico entri in collegamento con i terreni della copertura;
- la presenza di manifestazioni idrotermali o minerali.

Per l'identificazione di possibili aree già soggette a fenomeni di dissesto carsico si è fatto riferimento al Database Nazionale Sinkhole ISPRA (Figura 5.4.1) ed alla cartografia ufficiale della Regione Lazio (Meloni et al., 2012) (Figura 5.4.2).

Entrambe le cartografie tematiche non riportano, nelle zone interessate dai tracciati di progetto, situazioni note di sinkhole.



Fig. 5.4.1: Fenomeni di *sinkhole* censiti nel Database Nazionale Sinkhole (ISPRA) per l'area di interesse.

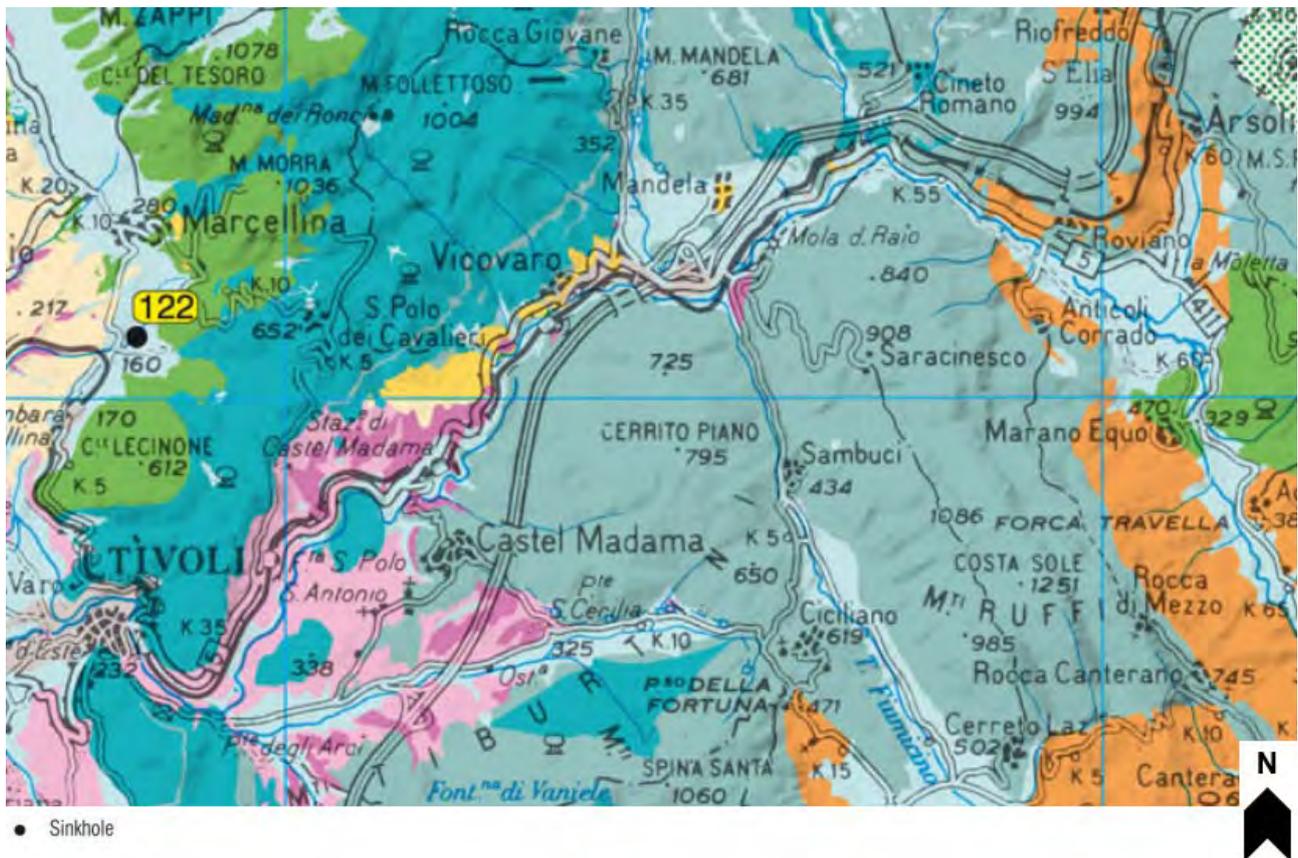


Fig. 5.4.2: Stralcio della Carta dei sinkhole nella Regione Lazio (ISPRA) per l'area di interesse. Con il codice "122" il sinkhole a Sud-Ovest di Marcellina.

Di particolare attenzione, nell'ottica del dissesto idrogeologico connesso a fenomeni di sinkhole e di subsidenza concentrata per fenomeni carsici, risulta essere l'area della piana di Mola di Regno. L'assetto geologico, caratterizzato da substrato carbonatico (calcarei micritici ed eventuali travertini) sottostante un notevole spessore di depositi quaternari di piana alluvionale, e quello idrogeologico, caratterizzato da circolazioni profonde e superficiali, potrebbero predisporre l'area a fenomeni di *piping sinkhole*, provocando l'erosione dal basso dei depositi continentali.

Al fine di determinare la presenza nel sottosuolo di eventuali deficit di massa e quindi di aree potenzialmente a rischio sinkhole, nella piana di Mola di Regno è stata effettuata una prospezione microgravimetrica, il cui areale di indagine copre le aree prossime al Manufatto Origine (Figura 5.4.5).



Fig. 5.4.3: Evidenza di una zona di depressione sub-circolare nei depositi alluvionali in corrispondenza della Piana di Mola di Regno (entro il perimetro dell'area di captazione ACEA).



Fig. 5.4.4: Dettaglio relativo ad un *sink* osservabile e nei depositi alluvionali in corrispondenza della Piana di Mola di Regno (entro il perimetro dell'area di captazione ACEA).



Fig. 5.4.5: In viola l'area oggetto di prospezione microgravimetrica, ubicata nella porzione della piana di Agosta prossima al manufatto "Origine". In rosso i tracciati di progetto.

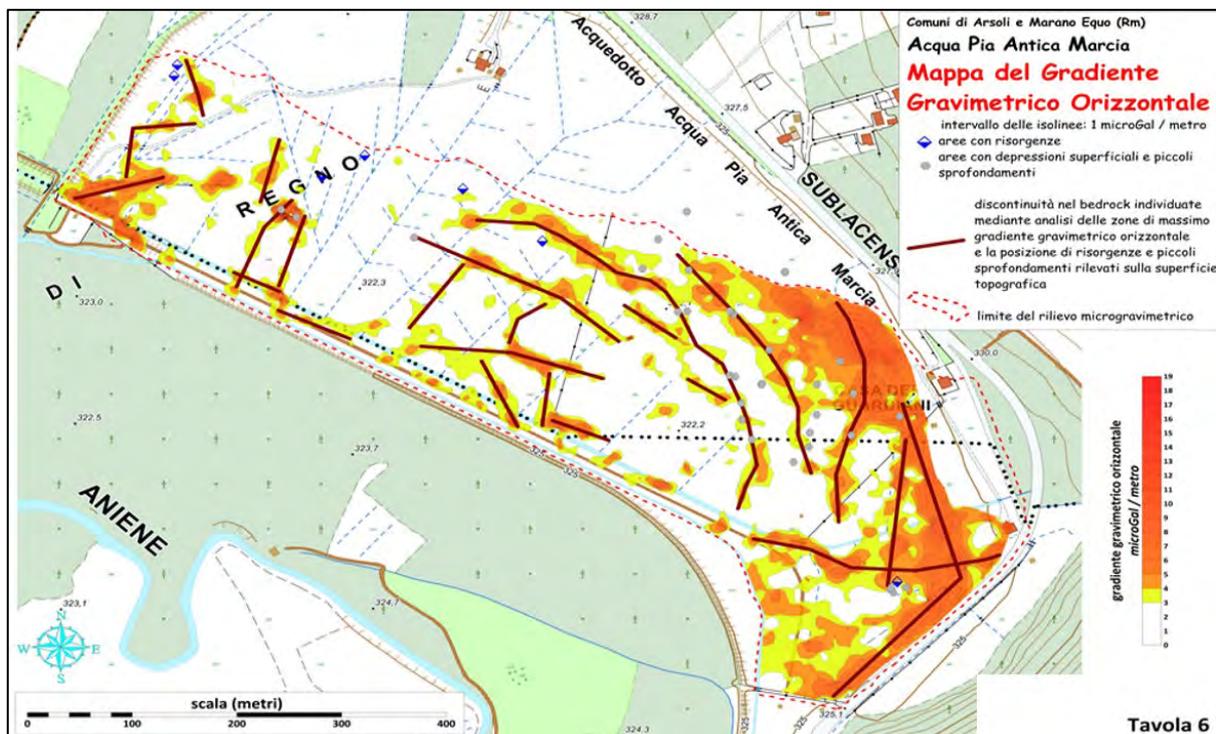


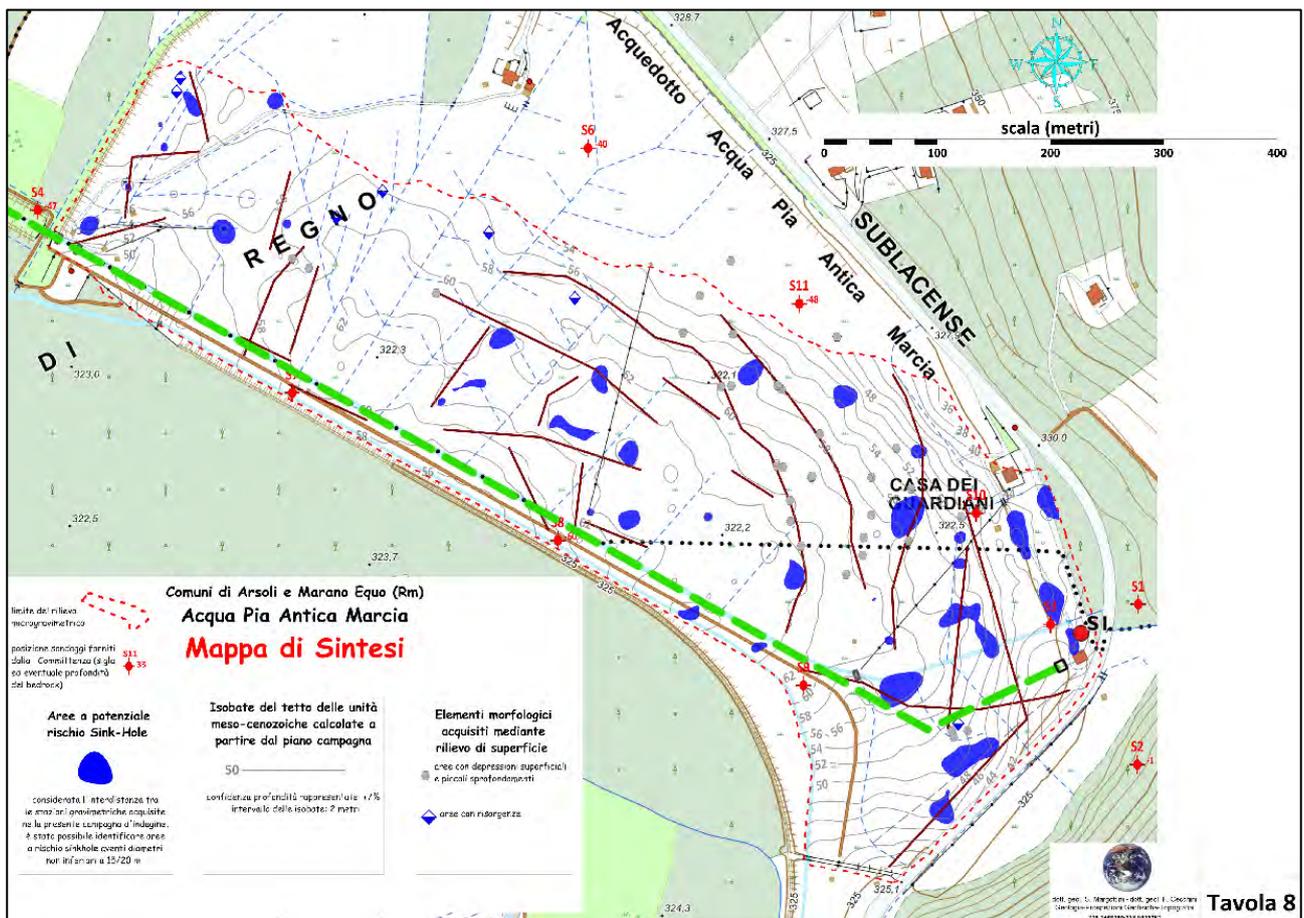
Fig. 5.4.6: Tavola di sintesi a partire dal gradiente gravimetrico orizzontale in zona Piana di Agosta.

La Figura 5.4.6, denominata "Mappa del Gradiente Gravimetrico Orizzontale", mostra le principali discontinuità nel bedrock, identificate analizzando il gradiente gravimetrico orizzontale. In tale mappa sono state proiettate anche l'ubicazione delle risorgenze e dei piccoli sprofondamenti rilevati sulla superficie topografica. Questi ultimi sono generalmente collocati nelle zone dove il gradiente gravimetrico orizzontale è più alto, a testimonianza della possibile interconnessione tra depressioni superficiali e fenomeni carsici profondi per risalita di acque attraverso linee di frattura preferenziali.

Si può quindi affermare che, stante l'assetto geologico ed idrogeologico, ed in base alla prospezione microgravimetrica eseguita nella piana di Mola di Regno, si denotano delle situazioni con deficit di massa presenti al di sotto del piano campagna. Questi deficit di massa, testimoniati da depressioni della superficie topografica e la cui ubicazione in prossimità del Manufatto Origine è visionabile in Figura 5.4.7, sono principalmente correlati con processi di soffusione che si sviluppano per la risalita delle acque attraverso le faglie che dislocano il substrato carbonatico, provocando l'erosione dei depositi continentali sovrastanti dal basso (*piping*).

5.4.1 Rischio sinkhole e tracciato di progetto

I risultati delle indagini microgravimetriche eseguite, al fine di verificare la presenza di deficit di massa riconducibili a fenomenologie sinkhole, hanno evidenziato la presenza di anomalie a carattere puntuale che peraltro non interessano il tracciato di progetto (vedi Figura 5.4.7).



Tale Figura, denominata "Mappa di sintesi", evidenzia i principali elementi topografici, idrogeologici, gravimetrici e la perimetrazione delle aree a potenziale rischio sinkhole. Si sottolinea la presenza di molteplici anomalie gravimetriche correlabili con aree a potenziale rischio sinkhole, prevalentemente concentrate nel settore centro-meridionale. Si fa notare che i minimi gravimetrici presenti sono caratterizzati da valori e gradienti variabili. Ciò riflette la dimensione dei volumi dei terreni decompressi e/o a rischio sinkhole e la loro posizione rispetto alla superficie topografica.

Le caratteristiche costruttive della nuova opera acquedottistica, che in questo tratto è costituita da uno scatolare in cemento armato giuntato, al cui interno sono alloggiato 2 condotte in acciaio, è perfettamente in grado di assorbire eventuali cedimenti differenziali che in ogni caso saranno monitorati secondo quanto previsto dal Piano Preliminare Geotecnico e Strutturale di cui all'Elaborato A250PDS R019.

Si rappresenta infine che, ad oggi, relativamente alle infrastrutture acquedottistiche esistenti, non sono state mai riscontrate problematiche di dissesto riconducibili ad effetti di subsidenza indotti da processi di piping sinkhole.

5.5 Rischio gas nel sottosuolo

Le indagini idrogeologiche ed idrogeochimiche condotte hanno evidenziato, in corrispondenza della confluenza del Torrente Scarpa nel Fiume Aniene, quanto di seguito riportato:

- L'emergenza di un volume di acque sotterranee significativo;
- Associato ad essa, una mineralizzazione peculiare delle acque sotterranee, come dimostrato sia dagli elevati valori conducibilità elettrica superiori ai 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (punti di campionamento 8, 12 e 13) sia dal chimismo delle acque (punti di campionamento 8, 9, 10, 11, 12 e 13), caratterizzato da un contenuto più elevato in Mg (tra 20 e circa 44 mg/l) e solfati (tra 15 e 20 mg/l) rispetto alle acque riferite agli altri settori dell'opera.

Si ritiene che in questo settore, arealmente piuttosto limitato, le acque sotterranee siano alimentate da una circolazione idrica sotterranea profonda, associata alla risalita di fluidi profondi lungo sistemi di faglie, coinvolgendo potenzialmente il basamento evaporitico dell'idrostruttura Sabina. Ciò risulta compatibile anche con la particolare tettonizzazione di questo settore.

Infatti, sulla base delle ricostruzioni geologiche e strutturali, in destra idrografica del Fiume Aniene, vi è la presenza di un mosaico di unità stratigrafiche cretacio-mioceniche. Esso risulta dislocato da un fitto sistema di faglie variamente orientate (set principali ad orientamento circa meridiano e WNW-ESE), con modesti rigetti, costituendo un'unità tettonica limitata inferiormente dal rilevante lineamento

compressivo riferibile alla Linea Olevano Antrodoco. Quest'ultima, a sua volta, risulta dislocata da un complesso network di faglie dirette post-orogeniche, il cui sistema principale si sviluppa con orientamento circa E-W. L'insieme di questi elementi dimostra la presenza di gas nel sottosuolo come CO₂ ed H₂S.

Si evidenzia che, anche nel settore della piana di Mola di Regno, in sinistra idrografica del Fiume Aniene, vi è la presenza di acque caratterizzate da anomale concentrazioni in solfati ed un elevato flusso gassoso (CO₂ - H₂S), probabilmente di origine profonda, veicolato da lineamenti tettonici attivi nel settore compreso tra la Linea Olevano-Antrodoco e la depressione strutturale che separa i Monti Ruffi dai Monti Simbruini.

5.6 Vincoli geologici / geomorfologici lungo il tracciato

In relazione all'inserimento dell'opera nel contesto geologico di inquadramento, si evidenzia che, relativamente alla prima parte del tracciato (area della Piana di Mola di Regno e Piana di Pantano) è stato considerato come vincolante il particolare assetto idrogeologico, che vede la presenza di un acquifero alluvionale saturo fino al piano campagna, direttamente alimentato dall'acquifero carbonatico dei Monti Simbruini, che ne costituisce il substrato, con direzioni di flusso orientate al fiume Aniene. Pertanto la scelta progettuale è stata quella di minimizzare le profondità di posa del nuovo acquedotto, al fine di non alterare la circolazione idrica sotterranea e non interferire con l'esercizio dei pozzi artesiani gestiti da ACEA. A tale scopo è stata scelta per questo tratto una funzionalità del nuovo acquedotto di tipo "a pelo libero" con profondità di posa contenute nell'orizzonte più superficiale e meno permeabile della sequenza alluvionale.

Più avanti, superata l'interferenza con l'area di alimentazione delle opere di captazione, la scelta progettuale è stata orientata ad un funzionamento di tipo in pressione, con posa dell'acquedotto a profondità necessariamente superiori, mediante tecnologia del microtunneling; in questo caso la scelta del tracciato è stata vincolata all'andamento morfologico, disegnando un percorso dell'acquedotto che in ogni caso consentisse le minori coperture rispetto al piano campagna, così da agevolare eventuali attività di manutenzione anche di carattere straordinario.

6. Caratterizzazione sismica dell'area

La sismicità relativa all'area della media valle del Fiume Aniene interessata dalla *Prima Fase Funzionale* è principalmente legata ai risentimenti dei terremoti prodotti dalle vicine strutture sismogeniche dell'Appennino centrale (settore aquilano/marsicano con ipocentri a distanza inferiore a 100 km), oltre che di eventuali terremoti regionali (con ipocentri a distanza maggiore di 100 km). Più localmente, entro un raggio di circa 20 km, dai cataloghi storici risulta una moderata sismicità relativa all'alta Valle dell'Aniene caratterizzata da scosse isolate o brevi crisi sismiche come quelle relative ai terremoti dell'8 settembre 1941 (Cervara di Roma) e 11 marzo 2000 (Canterano) di magnitudo massima 4.3 e risentimenti nell'area di intensità macrosismica (MCS) massima pari a 7 (Molin et al., 2002) (Pirro & Di Maro, 2002).

In particolare, analizzando la più recente versione del DISS (Database delle sorgenti sismogenetiche con terremoti potenziali superiori a $M_w=5.5$) a cura dell'INGV (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>), le sorgenti sismogeniche composite prossime all'area di progetto che concorrono a determinare la pericolosità sismica di base a cui essa è esposta sono di seguito evidenziate in Figura 6.1:

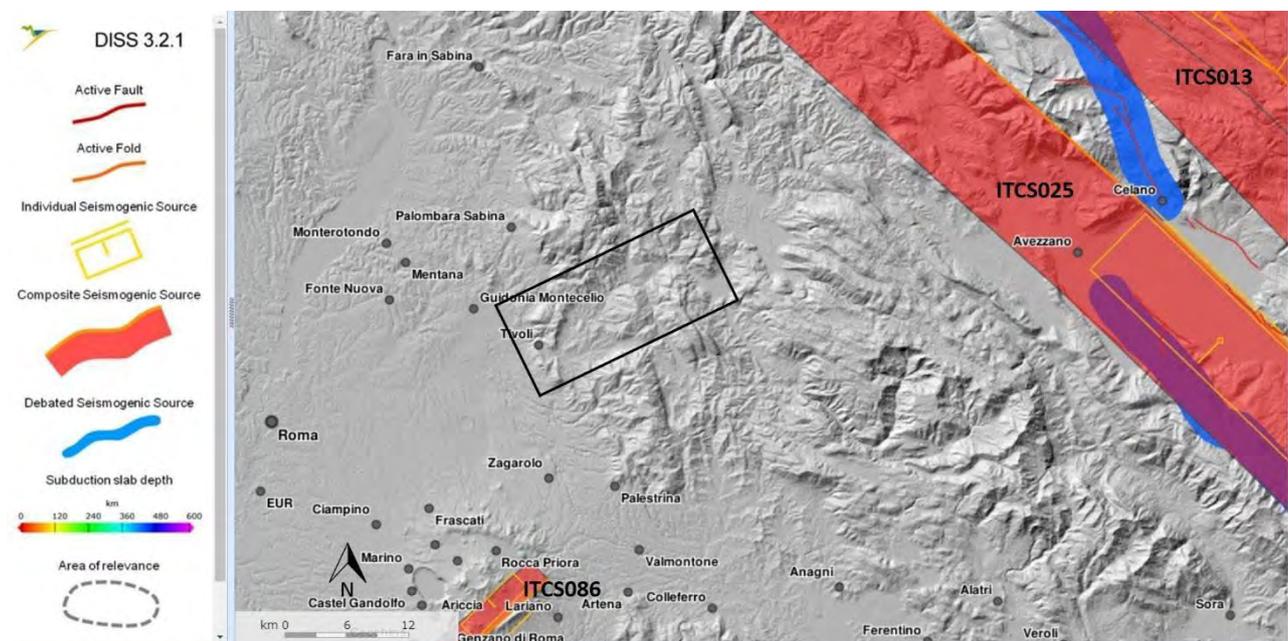


Fig. 6.1: Estratto della carta delle sorgenti sismogeniche (DISS 3.2.1 - 2018) prodotta da INGV (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>) relativo all'area interessata dai tracciati (in nero) del Nuovo Acquedotto Marcio.

- **ITCS086** "Castelli Romani" a circa 27 km SW del tracciato estesa per circa 20 km in direzione anti-appenninica con terremoti potenziali attesi di M_w massima pari a 5.6;
- **ITCS025** "Salto-Barrea-Ovindoli" tra 20-40 km a E-NE del tracciato, nell'area del distretto sismico Marsicano (comprendente, tra le altre, la struttura sismogenica individuale del "Bacino del Fucino") estesa su una fascia di 120 km in direzione NW-SE, cui è associata una M_w massima attesa pari a 6.7;
- **ITCS013** "Borbona-L'Aquila-Aremogna" a tra 40 e 60 km a E-NE del tracciato, estesa per circa 110 km in direzione NW-SE, (comprendente l'ampio distretto sismico aquilano con differenti sorgenti sismogeniche individuali tra le quali "Bacino di Montereale" e "Paganica") con M_w massima attesa pari a 6.5;

In riferimento al Catalogo ITHACA (curato e aggiornato da ISPRA, <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/viewer/>), contenente la collocazione spaziale delle faglie attive presenti sul territorio italiano, in special modo di quelle stimate in grado di produrre una significativa deformazione tettonica permanente in superficie (ovvero capaci), nell'area prossima a quella di progetto s'individuano due faglie che risultano nel complesso aver avuto attività dal tardo Pleistocene all'Olocene, come desunto da specifici studi essenzialmente di carattere geomorfologico; esse tuttavia non intersecano i tracciati del nuovo acquedotto (Figura 6.2):

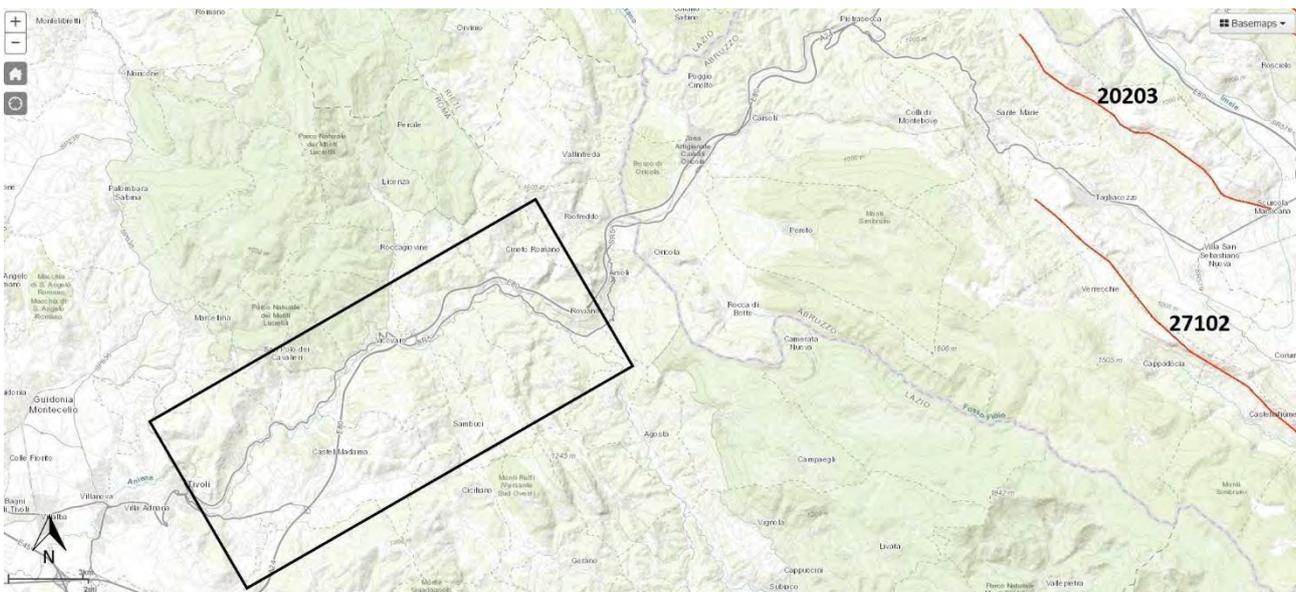


Fig. 6.2: Localizzazione e codice identificativo delle Faglie Capaci prossime all'area di progetto (evidenziata dal riquadro), come rappresentate nel Catalogo ITHACA (<http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>).

- **20203 "Scurcola Marsicana"** a circa 20-25 km a NE del dell'area di progetto, desunta attraverso rilievi geomorfologici, direzione appenninica e lunghezza di 13 km, cinematiso normale e ultima attività evidenziata da dislocamenti di depositi del Pleistocene superiore-Olocene;
- **27102 "Pagliara dei Marsi"** a circa 25 km a E del dell'area di progetto, desunta attraverso rilievi geomorfologici, direzione appenninica e lunghezza di 19 km, cinematiso normale e ultima attività evidenziata da dislocamenti di depositi del Pleistocene superiore-Olocene;

Non vi sono effetti sismoindotti al suolo (es. frane, cedimenti, collassi, fratturazione superficiale) inventariati nei cataloghi CEDIT (Catalogo Italiano degli Effetti Deformativi al Suolo Indotti da Forti Terremoti - <http://www.ceri.uniroma1.it/index.php/web-gis/cedit/>) (Fortunato et al., 2012) e CFTI 5Med (<http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>) (Guidoboni et al., 2018, 2019) nell'area di interesse per le condotte acquedottistiche in progettazione.

Secondo il Catalogo Parametrico dei Terremoti in Italia nella sua ultima versione (CPTI15, <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>), che considera oltre 4500 terremoti, nel periodo 1000-2017, di magnitudo ≥ 4 localizzati strumentalmente o indirettamente a partire da studi macrosismici e cataloghi strumentali, nell'area oggetto di studio risultano occorsi terremoti di M_w compresa tra 4 e 5 (Figura 6.3).

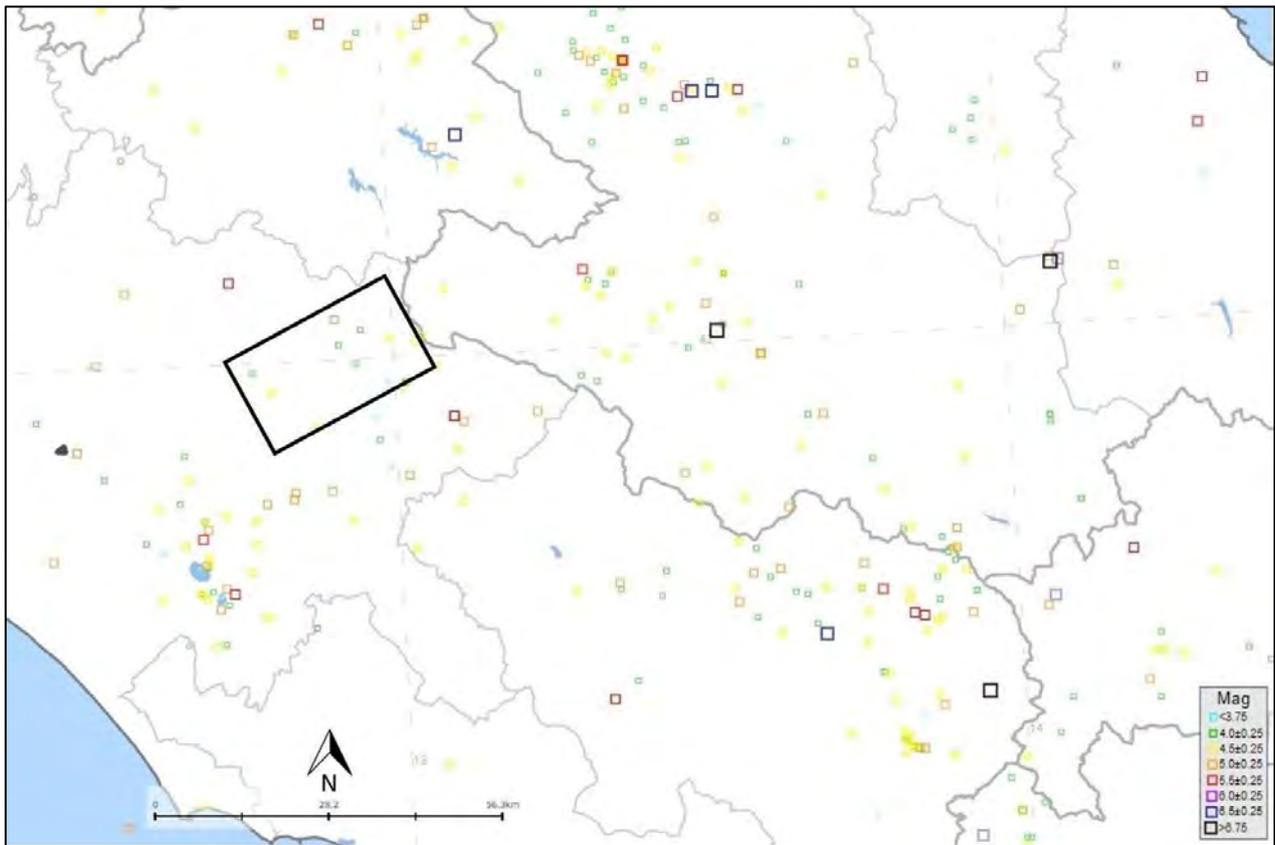
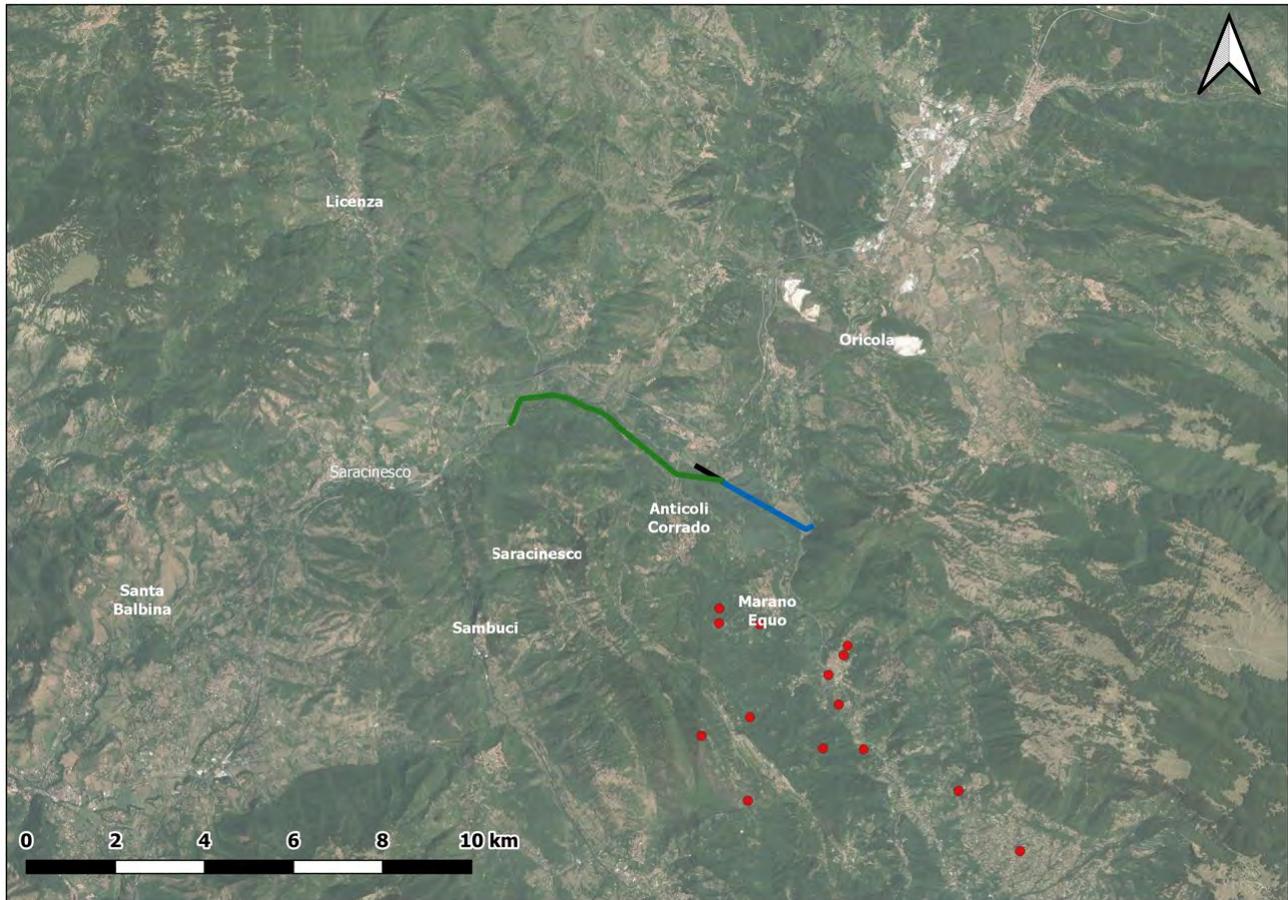


Fig. 6.3: Terremoti localizzati nel CPTI15 prodotto da INGV (<https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>) nell'area interessata dal presente studio.

Più nel dettaglio, considerando la distribuzione degli epicentri dei soli terremoti localizzati strumentalmente dall'INGV, disponibile a partire dal 1985 (Figura 6.4), è possibile notare come l'area di studio sia caatterizzata, come già evidenziato, da una modesta sismicità locale con terremoti di magnitudo in genere inferiore a 4 con l'eccezione per due eventi di magnitudo 4 e 4.3 dell'alta Valle dell'Aniene.



La consultazione del Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15 riferito al periodo 1000-2017, fonte INGV, <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>) relativo alla distribuzione delle massime intensità macrosismiche osservate in Italia per oltre 3000 terremoti, evidenzia, in un raggio di circa 20 km dai tracciati delle opere in progettazione, risentimenti di eventi sismici (Figura 6.5), con intensità (scala MCS) fino all'VIII grado, in gran parte dovuti a terremoti provenienti dai distretti sismici dell'Appennino abruzzese (L'Aquila, Marsica) e generati dalle strutture sismogeniche sopra descritte oltre a quelli derivanti dalla sismicità più locale della media-alta Valle dell'Aniene.

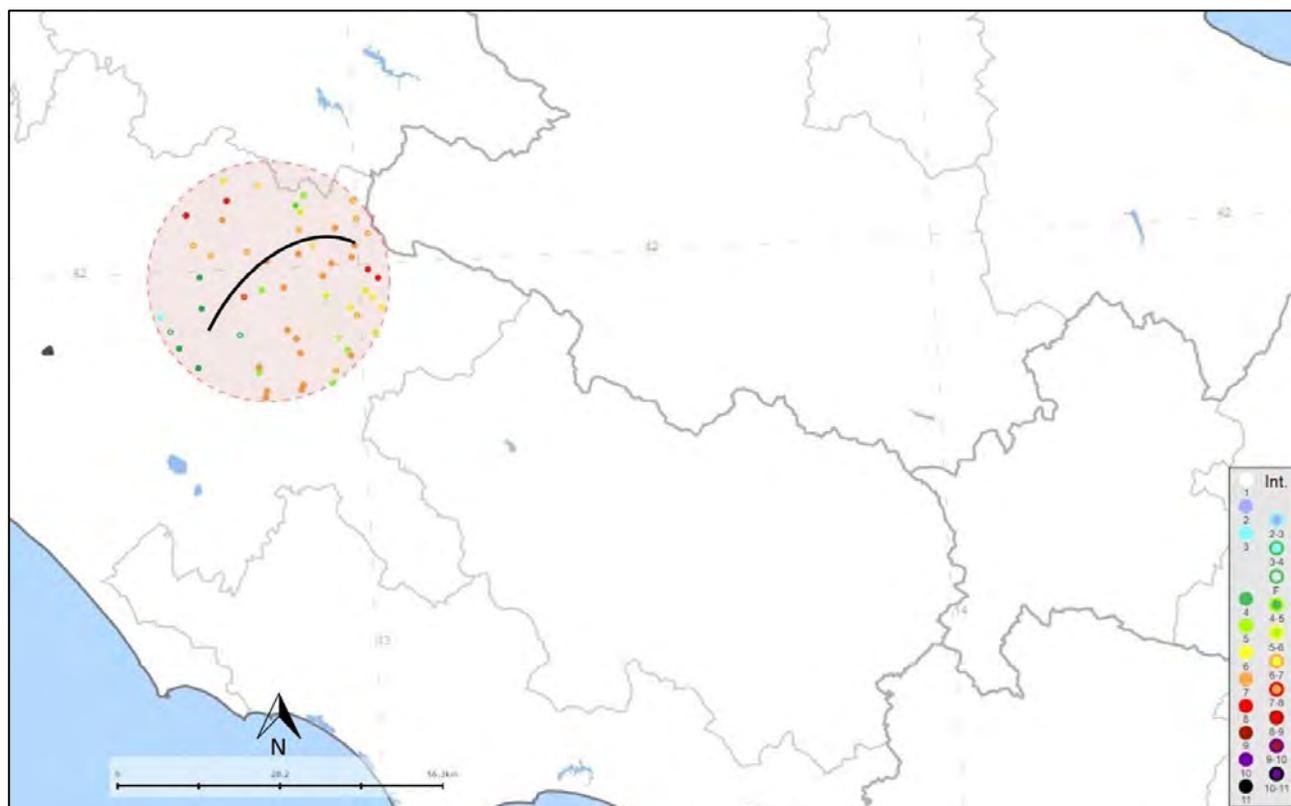


Fig. 6.5: Intensità macrosismiche (MCS) dei risentimenti nelle località prossime all'area di progetto in un raggio di circa 20 km come riportato nel DBI15 (<https://emidius.mi.ingv.it/CPT115-DBMI15>).

In buon accordo con quanto sopra, nello specifico dei Comuni interessati dal progetto (Roviano, Marano Equo, Anticoli Corrado, Mandela) la Carta delle massime Intensità Macrosismiche osservate, prodotta da ENEA per la Regione Lazio (DGR 835/2009), indica una intensità macrosismica MCS compresa tra 7 e 8.5 (Figura 6.6).

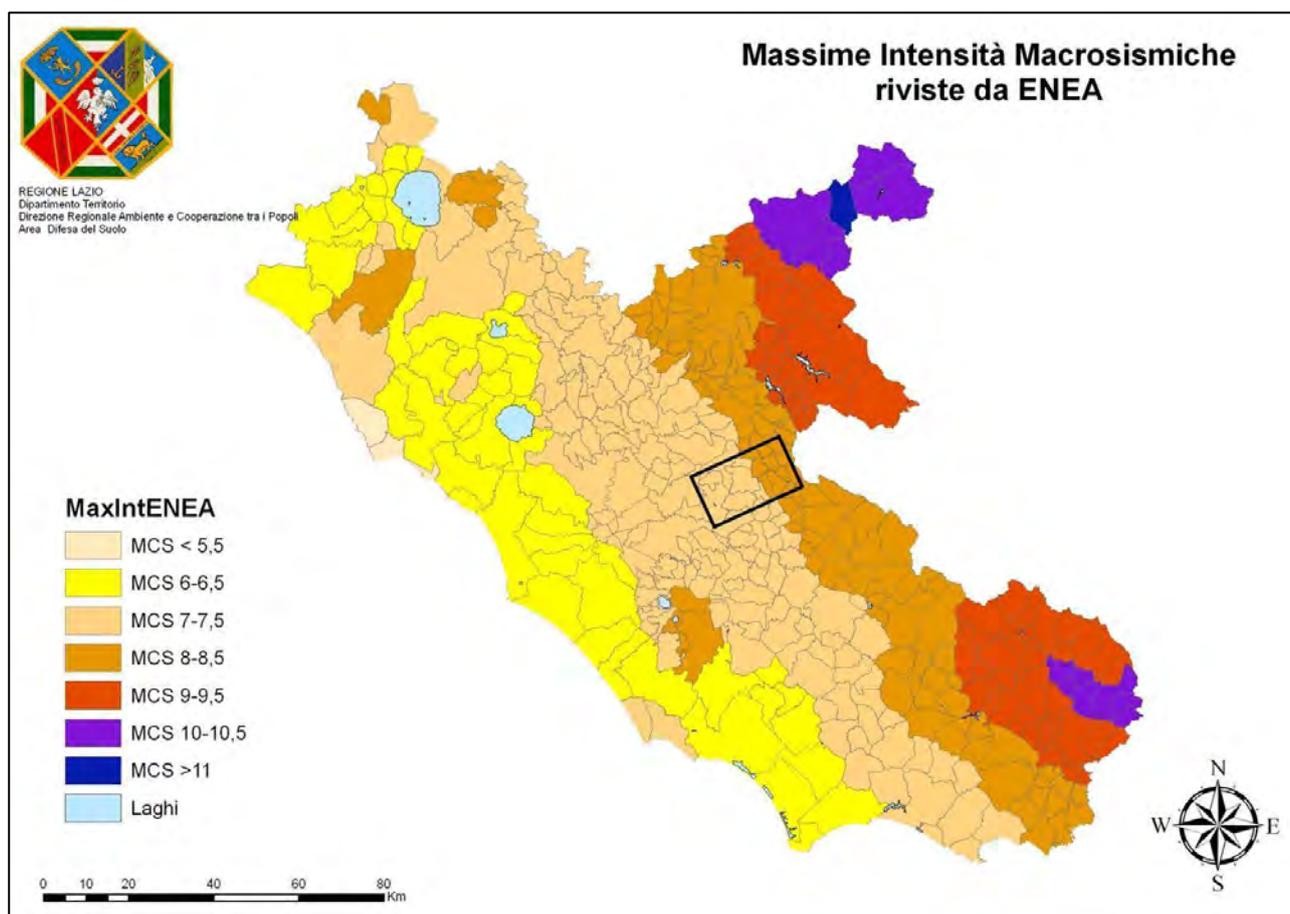


Fig. 6.6: Carta delle Massime Intensità Macrosismiche stimate per i diversi comuni della Regione Lazio.

6.1 Pericolosità sismica di base

Dal punto di vista normativo, secondo la vigente classificazione sismica del territorio della Regione Lazio, D.G.R. 387/2009, in recepimento dell'OPCM 3519/2006 recante i criteri generali per la definizione delle zone sismiche e i relativi valori di pericolosità sismica di base a scala nazionale, i Comuni interessati dall'area di progetto rientrano, a fini di pianificazione, esclusivamente nella Sottozona Sismica 2B cui corrispondono i valori di accelerazione di picco orizzontale (a_g), su suolo rigido (categoria A) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, indicati nella Figura 6.1.1.

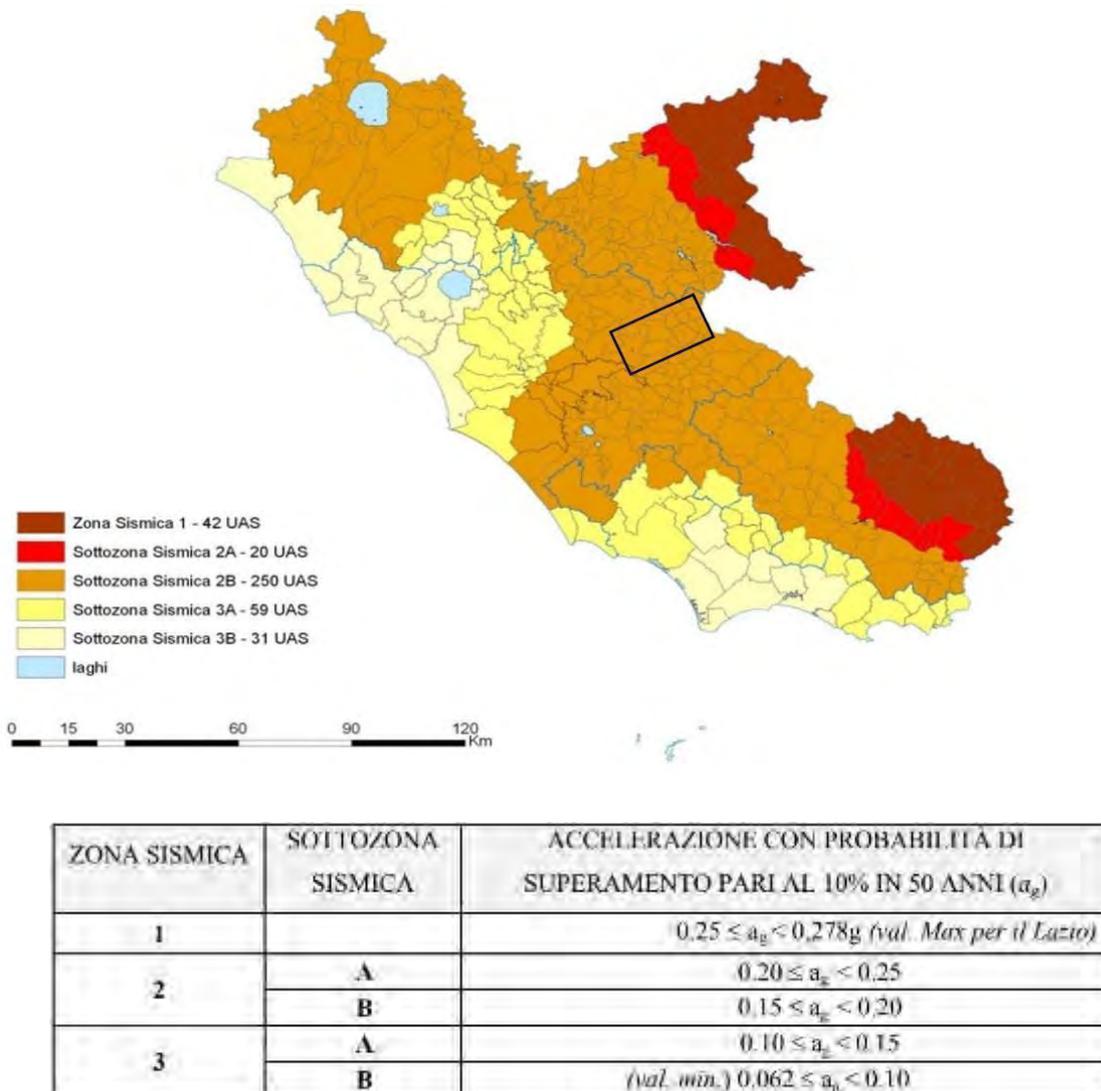


Fig. 6.1.1: Classificazione sismica della Regione Lazio (DGR 387/2009 e s.m.i.) e relativi valori di a_g corrispondenti alle differenti zone e sottozone sismiche; nel riquadro nero l'area di progetto.

Nello specifico della valutazione della pericolosità sismica di base (PGA attesa su suolo rigido e topografia orizzontale) nell'area interessata dai manufatti di progetto, si fa riferimento alle carte elaborate nell'ambito del Progetto DPC-INGV S1 (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) (Montaldo & Meletti, 2007) con valori di a_g (PGA) sito specifici (oltre che di F_0 e T^*c) legati alle scelte progettuali e alle relative verifiche agli Stati Limite previste dalla normativa vigente (DM 17/01/2018).

Considerando, per le strutture in progetto una Vita nominale di 100 anni e classe d'uso IV, sono stati ricavati i valori di a_g per gli Stati Limite di progetto SLD, corrispondente a un T_R di 201 anni, e SLC corrispondente a un T_R di 2475 anni (lo Stato limite SLV può essere accorpato in maniera conservativa a SLC stante le elaborazioni possibili fornite da INGV che non restituiscono valori corrispondenti al suo specifico tempo di ritorno di 1898 anni). Nelle figure seguenti sono mostrate le mappe di pericolosità sismica di base per i tempi di ritorno suddetti con relativa disaggregazione, in riferimento ai diversi siti interessati dalla progettazione, ricadenti nei comuni di Marano Equo, Roviano (Figura 6.1.2, Figura 6.1.3)

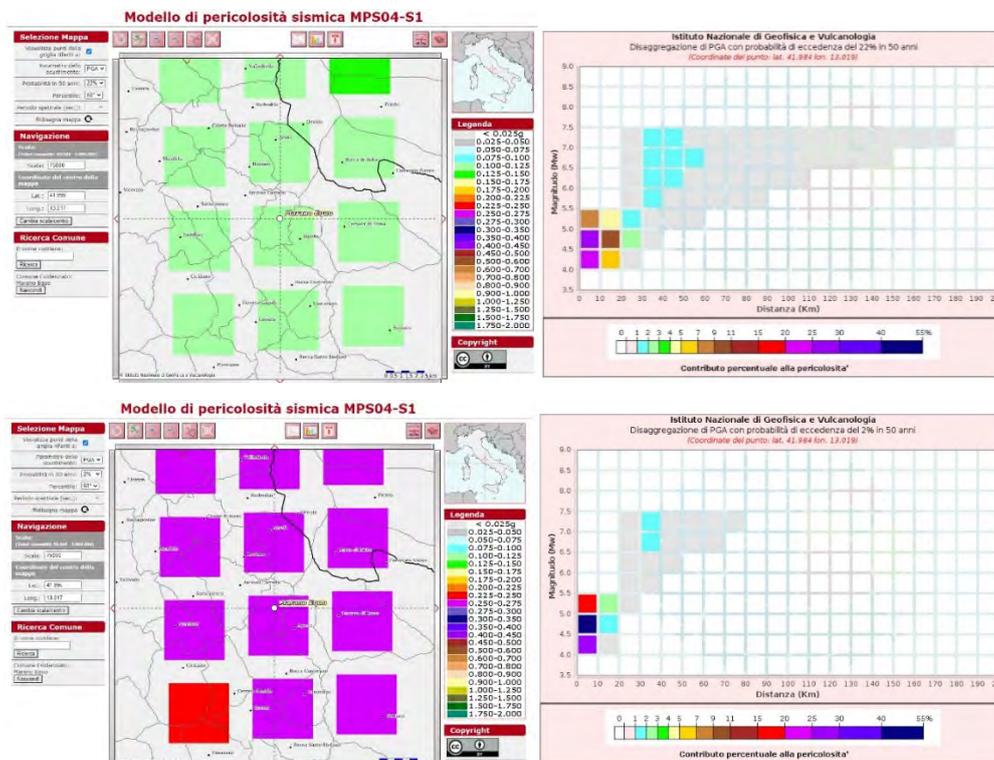


Fig. 6.1.2: Pericolosità sismica di base e relativa disaggregazione nell'area di tracciato (Mola di Regno) ricadente nel territorio del comune di Marano Equo (RM) per tempi di ritorno corrispondenti agli Stati Limite SLD (sopra) e SLV/SLC (sotto) per le opere in progetto.

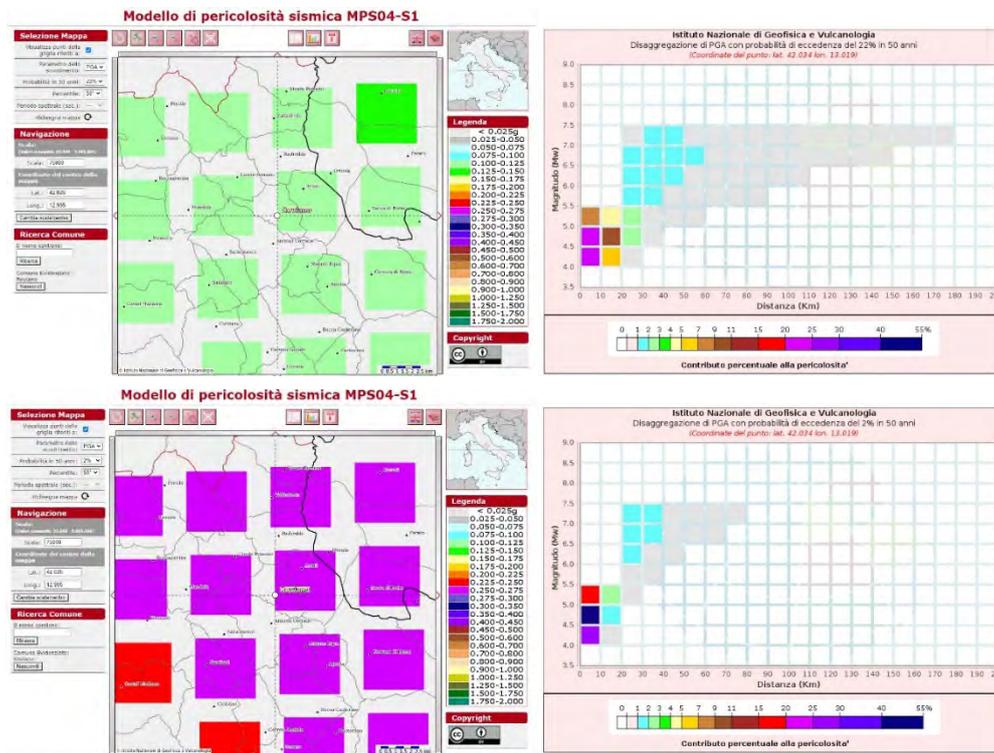


Fig. 6.1.3: Pericolosità sismica di base e relativa disaggregazione nell'area di tracciato ricadente nel territorio del comune di Roviano (RM) per tempi di ritorno corrispondenti agli Stati Limite SLD (sopra) e SLV/SLC (sotto) per le opere in progetto.

Dall'analisi di disaggregazione si evince che, per tutti i settori dell'area interessata dalla *Prima Fase Funzionale* e per entrambi i T_R considerati, il contributo principale alla PGA derivi da terremoti attesi di magnitudo tra 4 e 5.5 ad una distanza compresa entro i 10 e i 20 km circa, generalmente legati alla sismicità locale.

6.2 Suscettibilità alla liquefazione

Per la valutazione di possibili effetti di liquefazione sismica nell'area interessata dall'opera di progetto, è stato preventivamente consultato il Catalogo CEDIT (<https://gdb.ceri.uniroma1.it/>), il quale raccoglie gli effetti sismo-indotti in Italia, comprendenti evidenze di liquefazione dei terreni, ad opera dei terremoti verificatisi in un arco temporale che va dall'anno 1000 d.C. al 2018 con intensità epicentrale pari almeno all'VIII grado della scala MCS. Nel suddetto database, storicamente non risultano rilevati e registrati casi di liquefazione nella totalità delle aree interessate dalle opere in progetto.

Tuttavia, per alcuni settori caratterizzati dalla presenza di condizioni predisponenti a possibili effetti di liquefazione, come la presenza di depositi di riempimento vallivo comprendenti terreni sabbiosi entro i primi 20 m di profondità in condizioni di falda prossima al p.c., e stante i valori di accelerazione sismica massima attesa in superficie superiore a $0.1 g$ che non consentono di escludere le verifiche a liquefazione (*cf. 7.11.3.4.2, NTC 2018*), sono state effettuate, laddove presenti sufficienti indagini di sito e laboratorio, specifiche analisi di stabilità con metodi tabellari o analitici proposti dalla letteratura di riferimento.

In particolare, le verifiche sono state condotte, per due aree interessate dal tracciato, ovvero la piana di Mola di Regno e la piana di Pantano, dove sono state eseguite prove di sito comprendenti nell'insieme n.16 prove CPTU (Fig. 6.2.1).

Per quanto riguarda, invece, il Manufatto Origine e il Manufatto Nodo A, la verifica degli effetti di liquefazione sismica non è stata eseguita, in quanto presenti prove di sito e laboratorio comprendenti n.2 sondaggi geognostici S1 e S2, prove SPT ed il prelievo di campioni indisturbati per la caratterizzazione granulometrica e fisico-meccanica dei terreni attraversati (Fig. 6.2.1).



Fig. 6.2.1: Localizzazione delle prove CPTU 1-16 (piana di Mola di Regno e piana di Pantanto) e dei sondaggi geognostici S1 e S2 eseguiti in corrispondenza del Manufatto Origine e del Manufatto Nodo A.

Per le due aree indagate, è stato preliminarmente valutato il rischio liquefazione attraverso il metodo tabellare proposto dal Corps of Engineers e Bureau of Reclamation USA (USBR, 1952) (Figura 6.2.2), che tiene conto della suddivisione dei terreni in base al passante al setaccio 200 (0.075 mm) e della classificazione USCS, utilizzando i risultati delle prove CPTU, in base ai terreni attraversati.

MAGGIORI DIVISIONI		CLASSE	TIPO DI SUOLO	PROBABILITÀ DI LIQUIDAZIONE
Frazione passante al vaglio 0,075 mm ≤ al 50%	Ghiaie pulite Niente o poco fino	GW	Ghiaie ben graduate Mistura di sabbia e ghiaia	Da bassa a moderata
		GP	Ghiaie graduate male Mistura di sabbia e ghiaia	Bassa
	Ghiaie con fino	GM	Ghiaie limose Mistura di ghiaia sabbia e limo	Moderata
		GC	Ghiaie argillose Mistura di ghiaia sabbia e limo	Bassa
	Sabbie pulite Niente o poco fino	SW	Sabbie ben graduate, sabbie ghiaiose	Alta
		SP	Sabbie graduate male, sabbie ghiaiose	Da moderata ad alta
	Sabbie con fino	SM	Sabbie limose Mistura di sabbia e limo	Da moderata ad alta
		SC	Sabbie argillose Mistura di sabbia e argilla	Da bassa a moderata
Frazione passante al vaglio 0,075 mm > al 50%	Limi ed argille	ML	Limi inorganici con plasticità da bassa a media, argille ghiaiose, argille sabbiose, argille limose, argille magre	Da bassa
		CL	Argille inorganiche con plasticità da bassa a media, argille ghiaiose, argille sabbiose, argille limose, argille magre	Non liquefacibile
	OL	Limi organici ed argille limose organiche a bassa plasticità	Non liquefacibile	
	Limi ed argille	MH	Limi inorganici, sabbie fini micacee o suoli limosi	Non liquefacibile
		CH	Argille inorganiche ad alta plasticità, argille grasse	Non liquefacibile
	OH	Argille organiche da media ad alta plasticità, limi organici	Non liquefacibile	

Fig. 6.2.2: Metodo tabellare per la valutazione della probabilità di liquefazione basato sul tipo di suolo, secondo classificazione USCS, sviluppato dal Corps of Engineers e Bureau of Reclamation USA (USBR, 1952).

Successivamente, sono state eseguite verifiche analitiche, tramite metodi semplificati (con l'ausilio di specifiche suite software EPC in Liquefazione dei terreni, *Monaco, 2014*) sviluppati da vari autori che hanno permesso di definire il fattore di sicurezza alla liquefazione FS, dato dal rapporto tra la resistenza a taglio ciclico (CRR) e lo sforzo a taglio massimo ciclico (CSR) (Seed & Idriss, 1971) indotto dal sisma di progetto.

Per le analisi effettuate è stato considerato lo Stato limite di progetto SLC (T_R 2475 anni, comprendente cautelativamente anche SLV) con i parametri di disaggregazione e i valori di accelerazione massima al suolo (a_{max}).

Infine, dove possibile è stato stimato il rischio liquefazione per la stratigrafia dei terreni indagati, attraverso l'Indice del Potenziale di Liquefazione IPL di Iwasaki et al. (1978) che fornisce una misura degli effetti della liquefazione lungo la verticale basata sulla variazione del FS con la profondità (Tabella 6.2.2).

Tabella 6.2.1: Parametri utilizzati nei metodi analitici per le verifiche a liquefazione nei due siti esaminati.

Sito	Magnitudo media M	Distanza epicentrale media R	a_{max}
Piana di Mola di Regno	4.9	6.75 km	0.45 g
Piana di Pantano	4.95	7.11 km	0.52 g

Tabella 6.2.2: Valutazione del rischio di liquefazione lungo una verticale d'indagine in funzione del valore dell'Indice del Potenziale di Liquefazione IPL di Iwasaki et al., 1978.

Valore IPL	Rischio liquefazione
$IPL = 0$	Molto basso
$0 < IPL \leq 5$	Basso
$5 < IPL \leq 15$	Alto
$IPL > 15$	Molto alto

Per tutti i campioni indisturbati prelevati nel corso dei sondaggi geognostici si è verificata tale circostanza, pertanto non è stata effettuata la verifica a liquefazione. Per l'analisi di tutte le curve granulometriche si rimanda ai report presenti negli allegati.

6.2.1 Manufatto Origine

Per liquefazione di un terreno si intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi. I fenomeni di liquefazione interessano in genere depositi non coesivi saturi e dipendono principalmente da: proprietà geotecniche dei terreni, caratteristiche delle vibrazioni sismiche e loro durata, genesi, storia geologica dei terreni e profondità della falda. Le NTC18 richiedono una verifica alla suscettibilità di liquefazione dei terreni del sito sul quale insiste la progettazione dell'opera. La verifica a liquefazione può essere omessa (*paragrafo 7.11.3.4.2 NTC 2018*) quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1 g;
2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 metri dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc1N > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (SPT) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e $qc1N$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 6.2.1.1 (a) (NTC18) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ ed in Figura 6.2.1.1 (b) delle NTC18 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$.

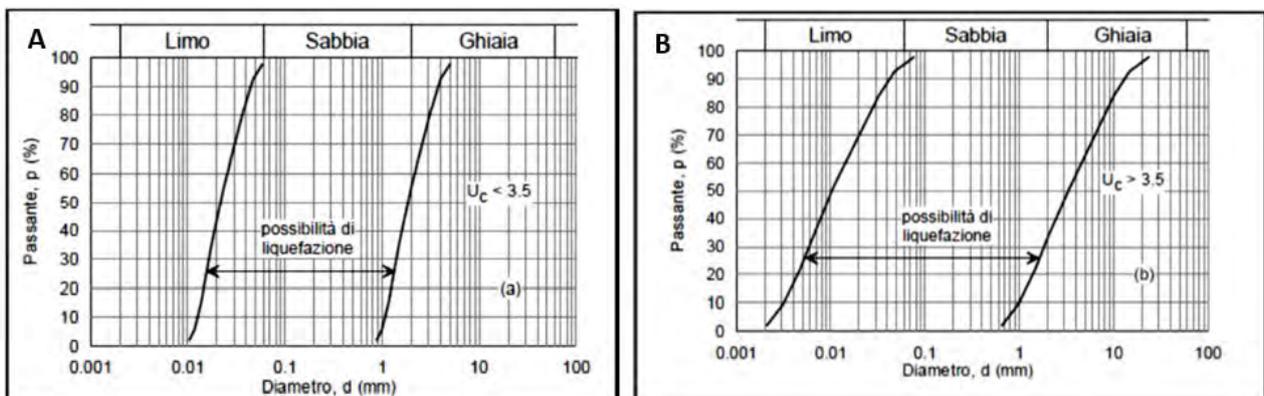


Fig. 6.2.1.1: Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione, come da normativa NTC18.

Nel caso dell'area del Manufatto Origine, in cui è stato eseguito il sondaggio geognostico S1, nel quale sono stati prelevati n. 4 campioni indisturbati alle profondità di 3.5-4.0 m, 6.5-7.0 m, 9.5-10.0 m e 12.5-13.0 m, e sulla base delle NTC18, la verifica a liquefazione può essere omessa, in quanto la distribuzione granulometrica dei campioni ricade all'esterno dei fusi granulometrici indicati da normativa NTC18 (Figura 6.2.1.2 , Figura 6.2.1.3 Figura 6.2.1.4).

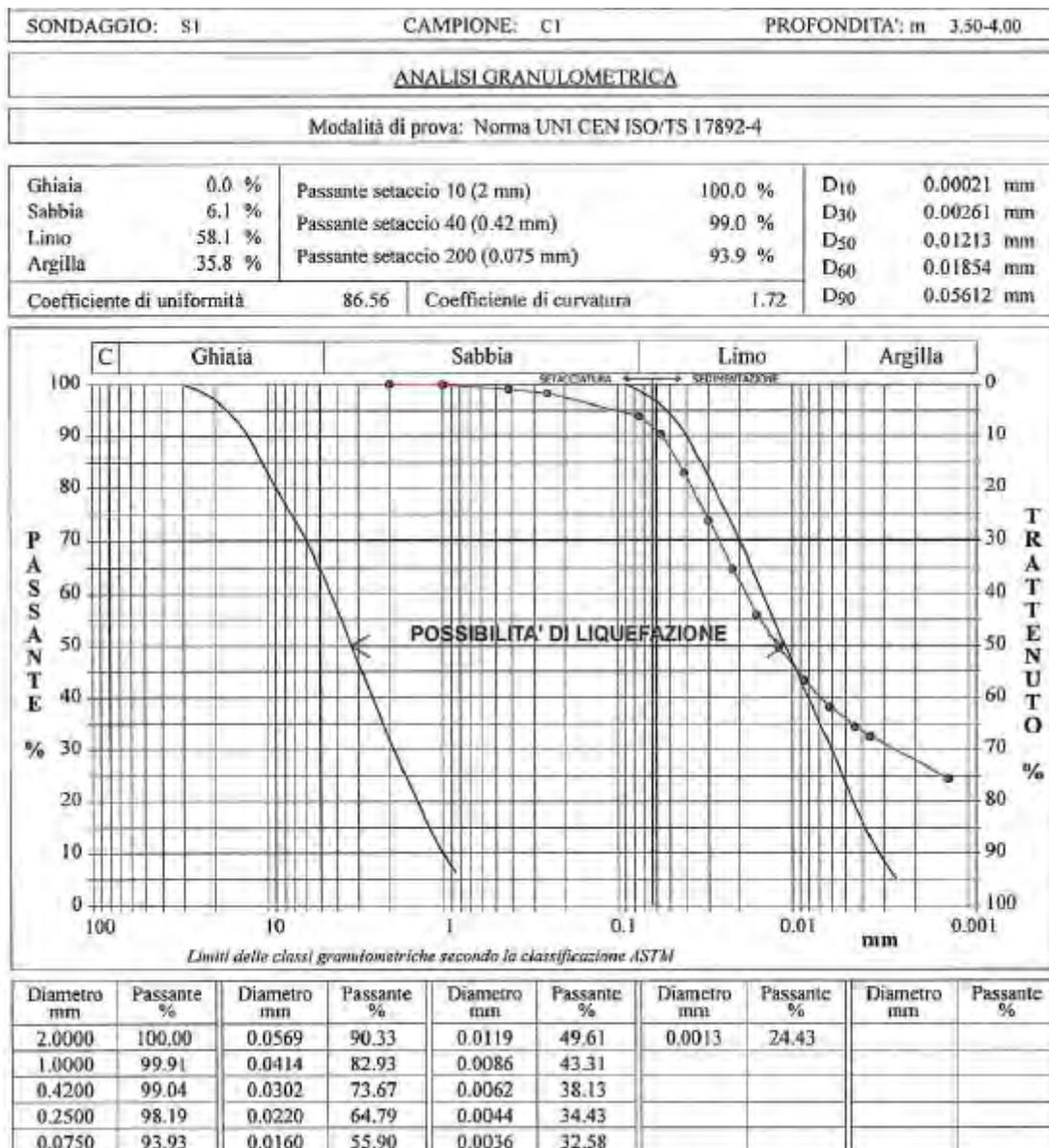


Fig. 6.2.1.2: Curva granulometrica campione indisturbato S1-C1.

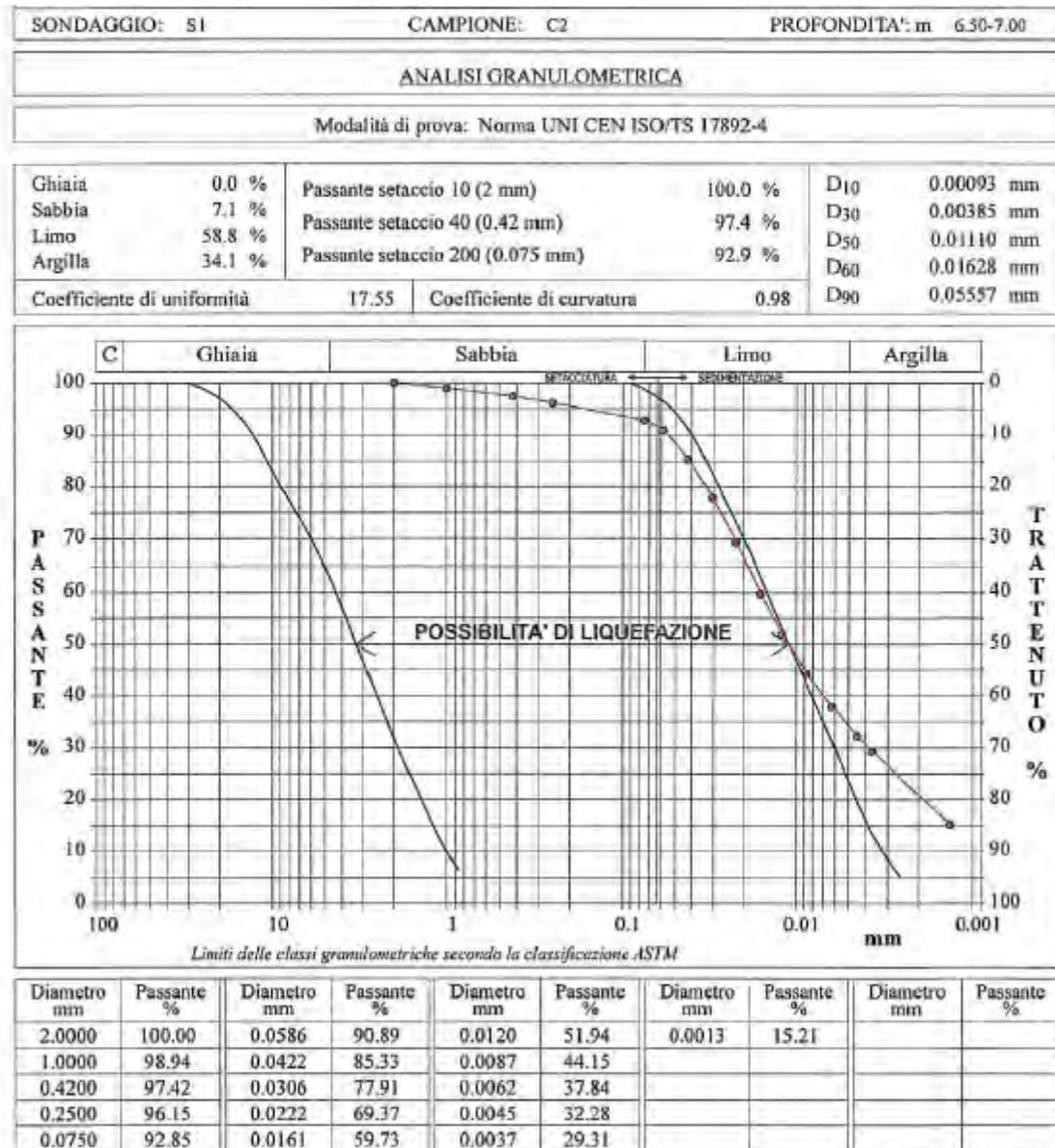


Fig. 6.2.1.3: Curva granulometrica campione indisturbato S1-C2.

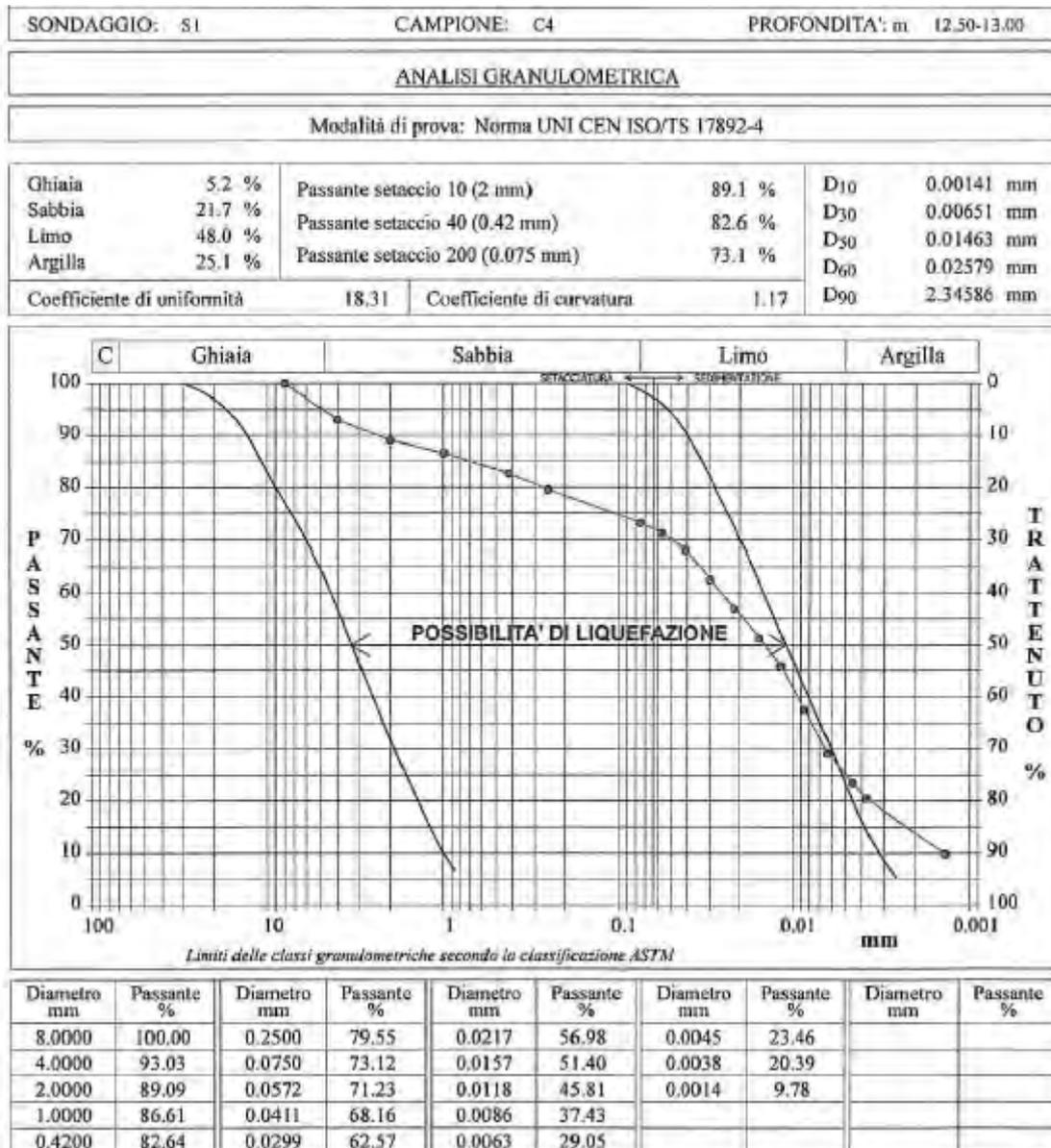


Fig. 6.2.1.3: Curva granulometrica campione indisturbato S1-C4.

6.2.2 Piana di Mola di Regno

Nell'area della piana di Mola di Regno, in base alla stratigrafia del sondaggio S1, il quale risulta essere il più prossimo a questo settore, i risultati delle prove di laboratorio, condotte su tre campioni indisturbati prelevati a 3.5, 6.5, e 12.5 m dal p.c., evidenziano la presenza di terreni a prevalente componente fine fino a 16 m di profondità dal p.c., classificati come MH-OH e CH e dunque, secondo il metodo tabellare precedentemente descritto, non liquefacibili; da 16 a 26 m di profondità sono invece presenti depositi ghiaioso-sabbiosi verosimilmente classificabili come GW o GP che presentano una probabilità di liquefazione medio-bassa (Figura 6.2.2).

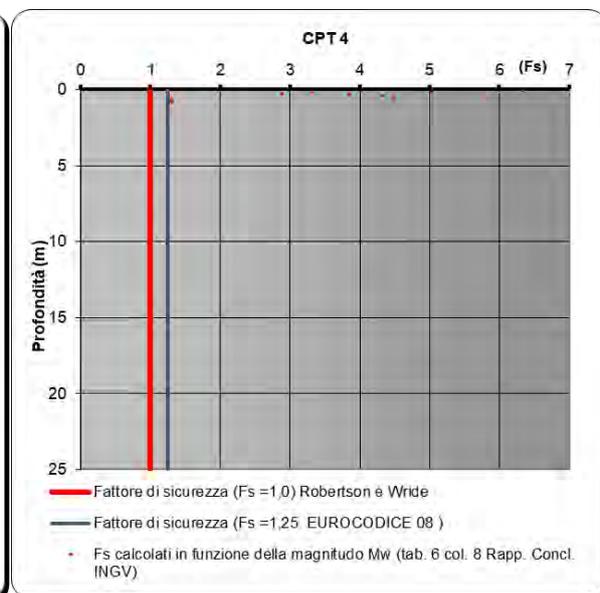
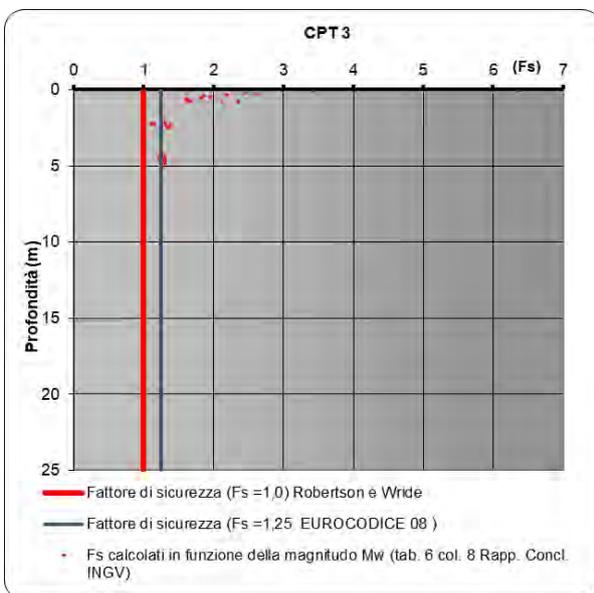
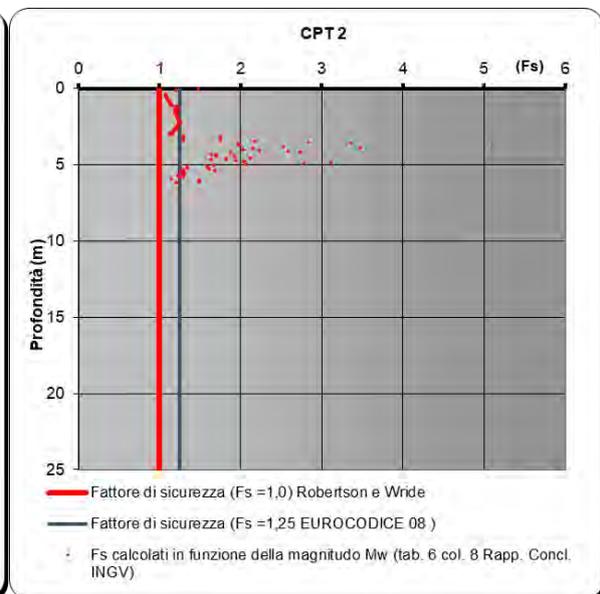
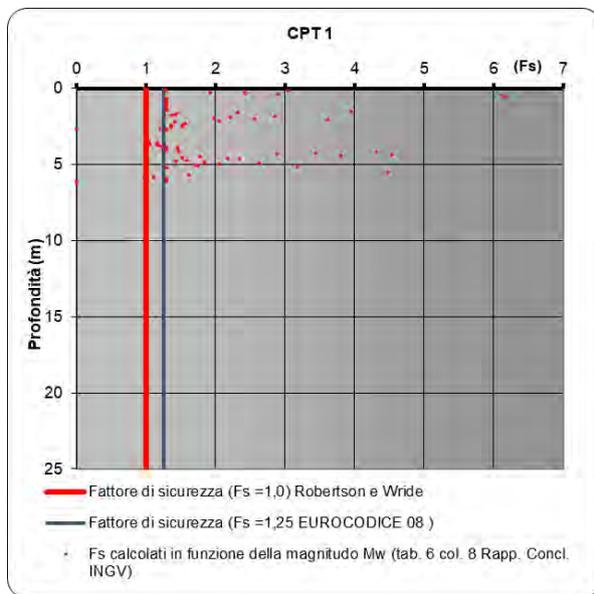
Analiticamente, una verifica a liquefazione è stata poi condotta attraverso l'uso dei dati delle prove penetrometriche statiche CPTU 1-8 (Figura 6.2.1), utilizzando il metodo semplificato di Robertson & Wride (1998) che determina la resistenza a taglio ciclico mobilitata (CRR) a partire da prove CPT considerando i valori di resistenza alla punta (q_c), resistenza all'attrito laterale (f_s) e tipo di comportamento del terreno attraversato (I_c) opportunamente corretti e normalizzati.

I risultati di tale verifica, lungo le 8 verticali d'indagine distribuite su un'area di lunghezza di circa 800 m con profondità comprese tra 6 e 14 m, mostrano (Figura 6.2.3) valori del fattore di sicurezza FS quasi sempre maggiori del limite di liquefacibilità stabilito dagli autori (1) e dall'EUROCODICE 8 (1.25) (per le prove con valori non calcolabili, FS è indicato per convenzione dal software uguale a 0); nel caso della prova CPT 6, i valori strumentali di resistenza alla punta e di attrito laterale pari 0 indicherebbero la presenza di terreni granulometricamente fini non liquefacibili, pertanto i valori di FS non sono calcolati e riportati nel grafico.

Per le sole prove CPTU 3, 4 e 5 è stato possibile calcolare l' IP_L (Tabella 6.2.2) che ha restituito valori corrispondenti a un rischio liquefazione "basso" o "molto basso" che si può assumere per l'intera area investigata della piana di Mola di Regno (Tabella 6.2.3).

Tabella 6.2.3: Indice del Potenziale di Liquefazione I_{PL} per le prove CPT 1-8 eseguite nell'area della piana di Mola di Regno; N.C. indica valore non calcolabili

CPTU	Profondità prova (m)	IPL
1	6.25	N.C.
2	6.18	N.C.
3	6.2	0.002
4	6.25	0
5	6	0
6	13.9	N.C.
7	10.2	N.C.
8	8.2	N.C.



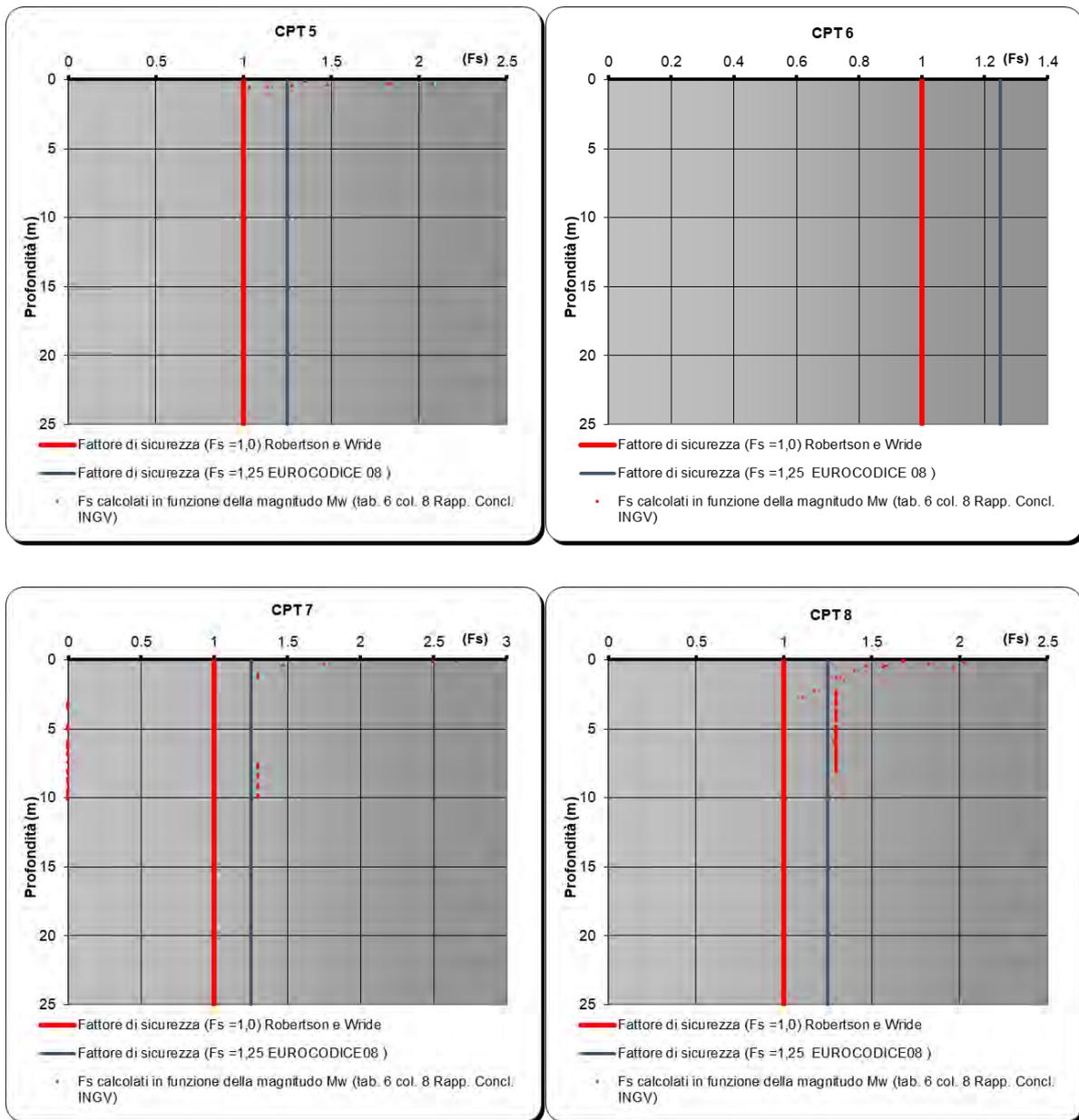


Fig. 6.2.3: Andamento con la profondità del Fattore di sicurezza FS (con relativa soglia di liquefacibilità secondo gli Autori e l'EUROCODICE 8) calcolato con il metodo semplificato di Robertson & Wride (1998) per le 8 prove CPTU eseguite nell'area della piana di Mola di Regno; (i valori 0 indicano profondità con FS non calcolabili; i valori 1.3 costanti con la profondità per le CPTU 7 e 8, indicano terreni classificati come argillosi non liquefacibili; per la CPTU 6 non è stato possibile calcolare FS in quanto i valori strumentali di resistenza alla punta e di attrito laterale sono pari a 0).

6.2.3 Piana di Pantano

Nell'area della piana di Pantano, sono stati utilizzati, per la verifica a liquefazione i dati provenienti sia dal sondaggio geognostico S2, il quale risulta essere il più prossimo a questo settore, sia dalle prove penetrometriche statiche CPTU 9-16 eseguite in sito.

Utilizzando preliminarmente il già citato metodo tabellare proposto dal Corps of Engineers e Bureau of Reclamation USA (USBR, 1952), i terreni attraversati dal sondaggio S2 risultano per i primi 11 m a carattere prevalentemente coesivo (classificati dalle prove di laboratorio MH-OH a 2 e 10 m di profondità e CH a 7 m di profondità) e dunque non liquefacibili; da 11 a 20 m la presenza di uno strato sabbioso classificabile in sabbia argillosa SC (come risultato da analisi granulometrica eseguita su campione a 17 m di profondità), riconduce a una probabilità di liquefazione da bassa a moderata (Figura 6.2.1).

Tenuto conto dei dati delle prove di laboratorio sui campioni indisturbati prelevati nel sondaggio S2, delle 4 prove penetrometriche dinamiche SPT eseguite a 3, 7, 11 e 15 m di profondità (Tabella 6.2.2.1) e di una profondità media della falda a -2 m dal p.c., è stata eseguita una verifica analitica a liquefazione, secondo quattro diversi metodi semplificati di letteratura (Seed & Idriss, 1982; Seed et al., 1985; Idriss I.M. & Boulanger, 2004; Rauch, 1998), basati sul valore di N_{spt} , che ha permesso di ricavare per i terreni fino a 20 m dal p.c., il fattore di sicurezza FS in base al sisma di progetto (Tabella 6.2.2.1).

Tabella 6.2.2.1: Parametri relativi alla stratigrafia del sondaggio S2 fino a 20 m dal p.c. ricavati dalle prove in sito e di laboratorio utilizzati per la verifica a liquefazione secondo i metodi semplificati che prevedono l'uso di prove SPT.

Strato	Spessore (m)	γ (kN/m ³)	d 50 (mm)	FC %	Prof. SPT (m)	Nspt
Argilla sabbiosa	3.5	17.9	0.016	88	3	14
Argilla sabbiosa	6.5	18.7	0.154	79.2	7	10
Argilla limosa	1	18.7	0.008	93.1	11	17
Sabbia argillosa	9	19.4	0.272	37.3	15	40

Come si evidenzia in Figura 6.2.2.1, il fattore di sicurezza FS nei confronti della liquefazione risulta sempre superiore al valore limite di non liquefacibilità previsto dagli autori (1) e a quello indicato dall' EUROCODICE 8 (1.25); l'unica eccezione è data dal metodo di Rauch (1998) per il quale esiste la possibilità di liquefazione nello strato sabbioso alla profondità d'indagine di 15 m, che sarebbe in accordo anche con quanto indicato dal metodo tabellare precedentemente descritto che fa riferimento all'analisi granulometrica sul campione di terreno prelevato a 17 m di profondità nel sondaggio S2.

In sintesi, considerando l'Indice del Potenziale di Liquefazione IP_L sempre pari a 0, calcolato con i valori di FS per la verticale con stratigrafia di Tab. 6.2.2.1, il rischio liquefazione risulta "molto basso" (come da Tab. 6.2.2).

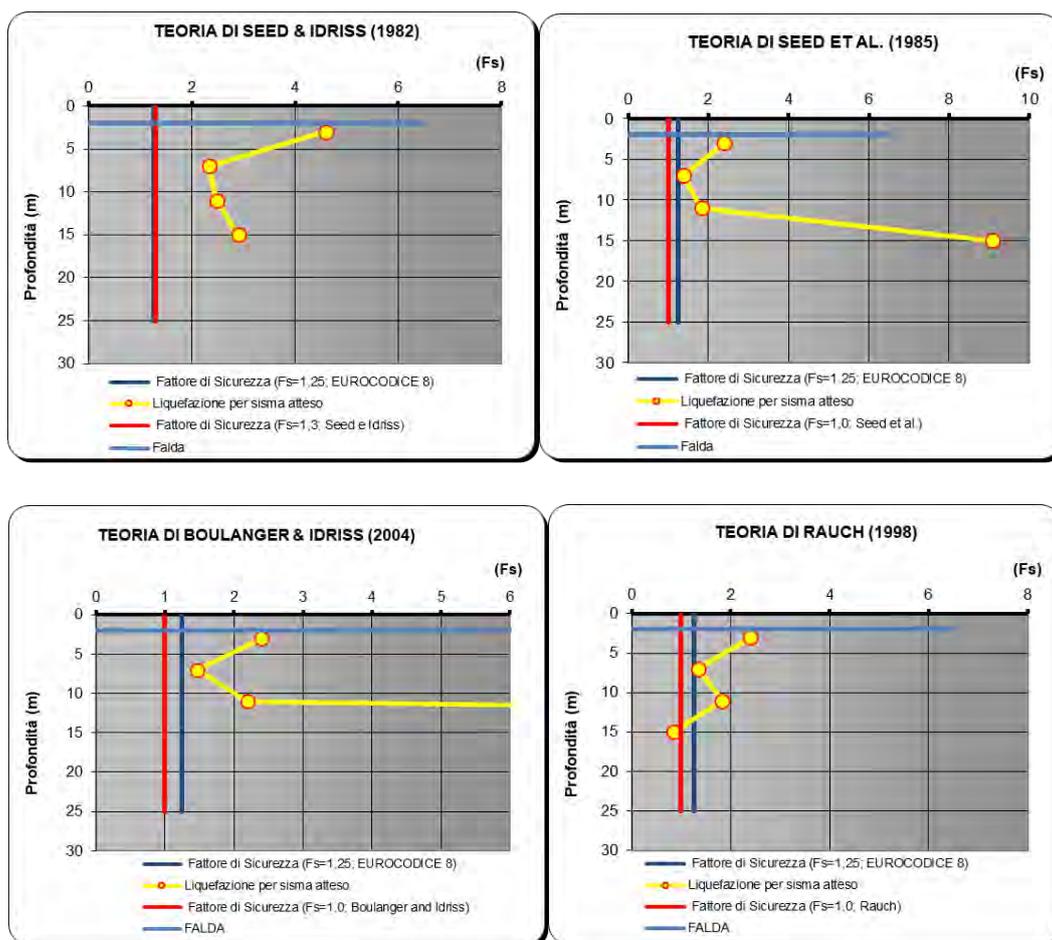


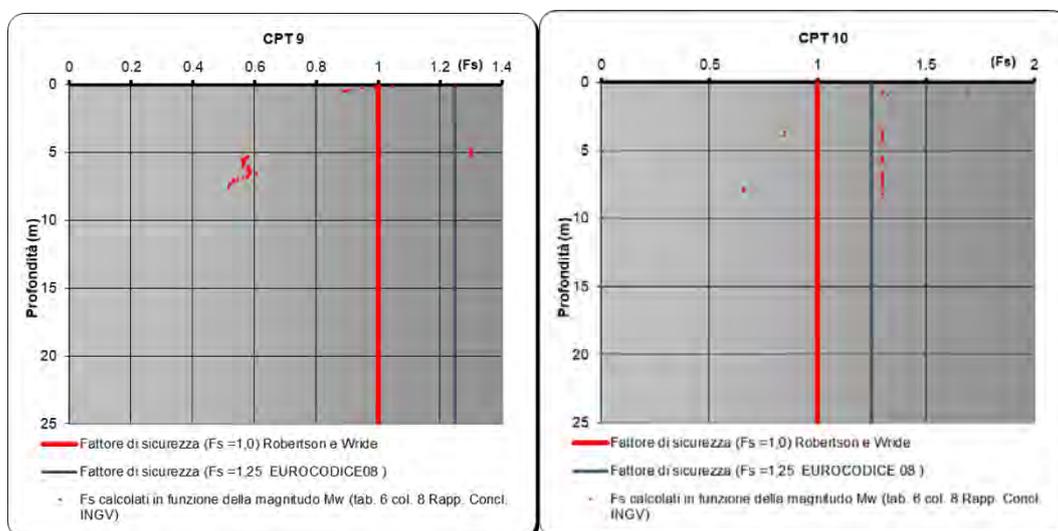
Fig. 6.2.2.1: Fattore di sicurezza FS indicante la possibilità o meno di liquefazione (secondo i diversi metodi semplificati di verifica) alla profondità di esecuzione delle prove SPT eseguite per la stratigrafia di Tabella 6.2.2.1.

Dall'analisi dei dati derivanti dalle prove CPTU (9-16 in Figura 6.2.1), distribuite su un'area di lunghezza di circa 500 m con profondità comprese tra 7.6 e 17 m circa, è stato calcolato sempre attraverso il metodo di Robertson & Wride (1998), il fattore di sicurezza a liquefazione a varie profondità e laddove possibile il conseguente rischio di liquefazione (IP_L) complessivo per ognuna delle 8 verticali d'indagine.

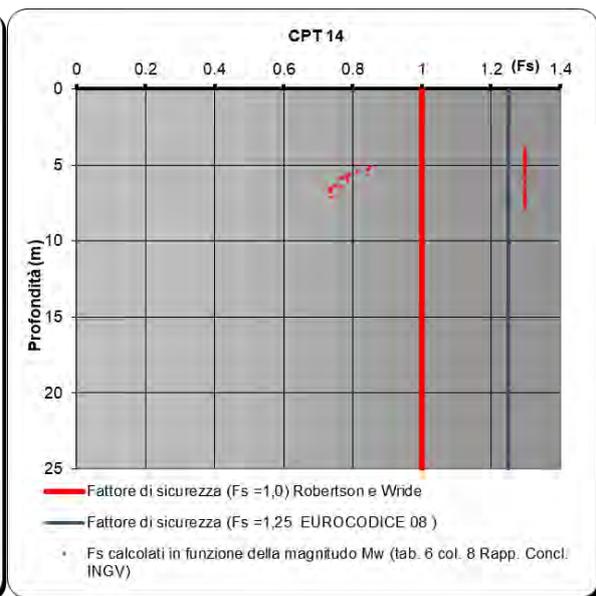
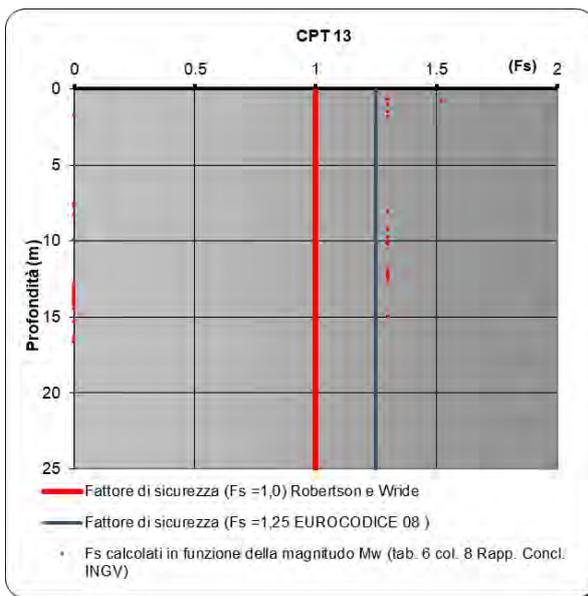
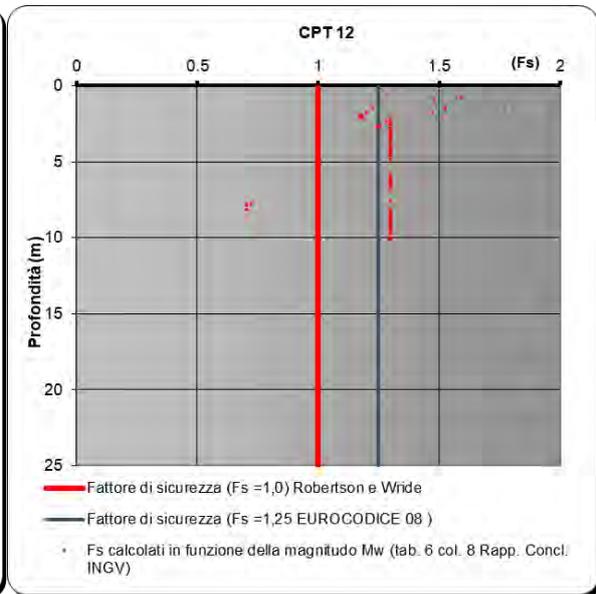
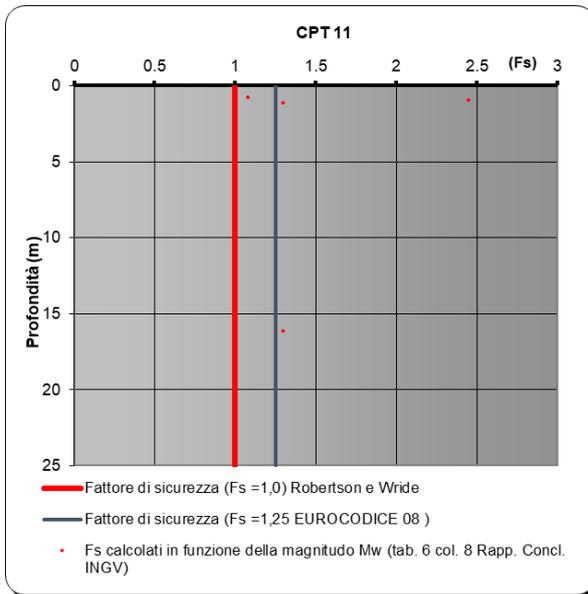
I risultati, riassunti in Figura 6.2.2.2, mostrano per l'area della piana di Pantano, F_s generalmente superiori al valore soglia di liquefazione stabilito dagli autori (1) e dall'EUROCODICE 8 (1.25), con valori di IP_L (Tabella 6.2.2.2) riferibili, dove calcolabili, a un rischio "basso" o "molto basso", in accordo con quanto ottenuto anche dall'analisi con prove SPT e con i risultati della contigua area della piana di Mola di Regno.

Tabella 6.2.2.2: Indice del Potenziale di Liquefazione IP_L per le prove CPT 9-16 eseguite nell'area di Pantano; N.C. indica valori non calcolabili

CPT	profondità prova (m)	IP_L
9	7.6	4.16
10	8.2	0.62
11	16.3	0
12	10.2	N.C.
13	16.8	N.C.
14	8.2	N.C.
15	10.2	N.C.
16	8.2	0



RELAZIONE GEOLOGICA



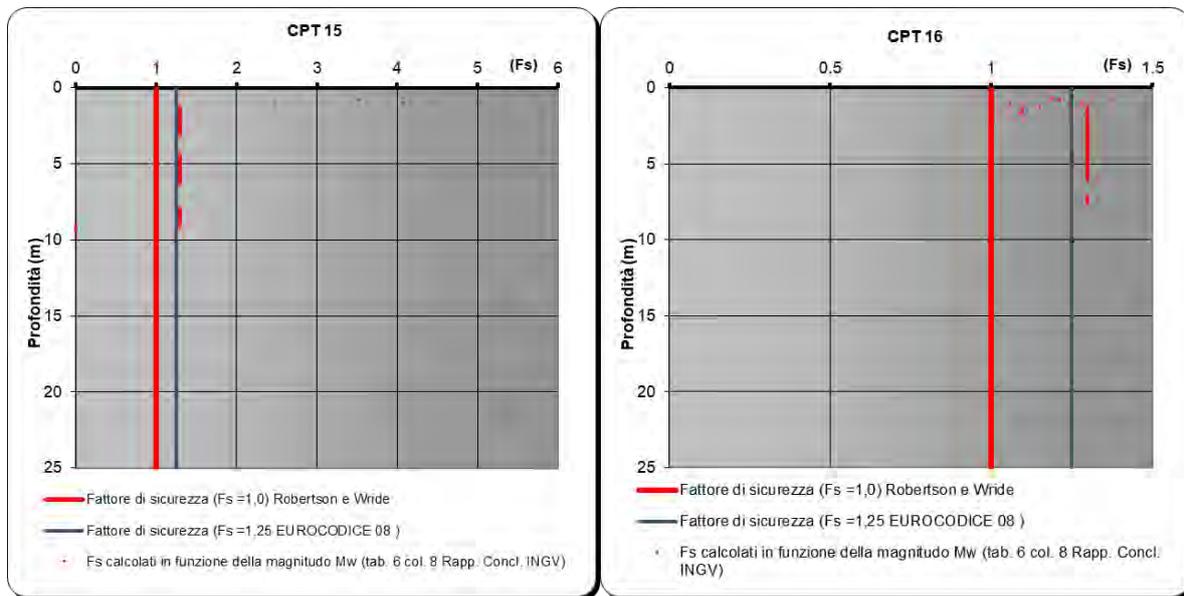


Fig. 6.2.2.2: Andamento con la profondità del Fattore di sicurezza FS (con relativa soglia di liquefacibilità secondo gli Autori e l'EUROCODICE 8) calcolato con il metodo semplificato di Robertson & Wride (1998) per le 8 prove CPTU eseguite nell'area della piana di Pantano (i valori 0 indicano profondità con FS non calcolabili; i valori a 1.3 costanti con la profondità indicano terreni classificati come argillosi non liquefacibili).

In conclusione, per l'area della piana di Pantano, seppure il rischio liquefazione risulti complessivamente basso, come evidenziato dalle verifiche effettuate con diversi metodi, non è possibile escludere la presenza di strati localmente liquefacibili entro in 10 m di profondità, a causa dell'eterogeneità stratigrafica dei depositi di riempimento vallivo.

A tal proposito, da sottolineare come per le prove CPTU 9, 10, 12, e 14, le verifiche lungo la verticale evidenzino alcuni valori di $FS < 1$ a profondità comprese tra 4 e 8 m circa, ad indicare la presenza di possibili strati sabbiosi liquefacibili (Figura 6.2.2.2) di spessore compreso tra 30-40 cm (CPTU 10 e 12) e 2-2.5 m (CPTU 9 e 14).

6.2.4 Manufatto Nodo A

Per liquefazione di un terreno si intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi. I fenomeni di liquefazione interessano in genere depositi non coesivi saturi e dipendono principalmente da: proprietà geotecniche dei terreni, caratteristiche delle vibrazioni sismiche e loro durata, genesi, storia geologica dei terreni e profondità della falda. Le NTC18 richiedono una verifica alla suscettibilità di liquefazione dei terreni del sito sul quale insiste la progettazione dell'opera. La verifica a liquefazione può essere omessa (*paragrafo 7.11.3.4.2 NTC 2018*) quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1 g;
2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 metri dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (SPT) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 6.2.1.1 (a) (NTC18) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ ed in Figura 6.2.1.1 (b) delle NTC18 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$.

Nel caso dell'area del Manufatto Nodo A, in cui è stato eseguito il sondaggio geognostico S2, nel quale sono stati prelevati n. 5 campioni indisturbati alle profondità di 2.0-2.5 m, 6.5-7.0 m, 10.0-10.5 m, 14.0-14.5 m e 17.0-17.5 m, e sulla base delle NTC18, la verifica a liquefazione può essere omessa, in quanto la distribuzione granulometrica dei campioni ricade all'esterno dei fusi granulometrici indicati da normativa NTC18 (Figura 6.2.4.1 , Figura 6.2.4.1 Figura 6.2.4.1).

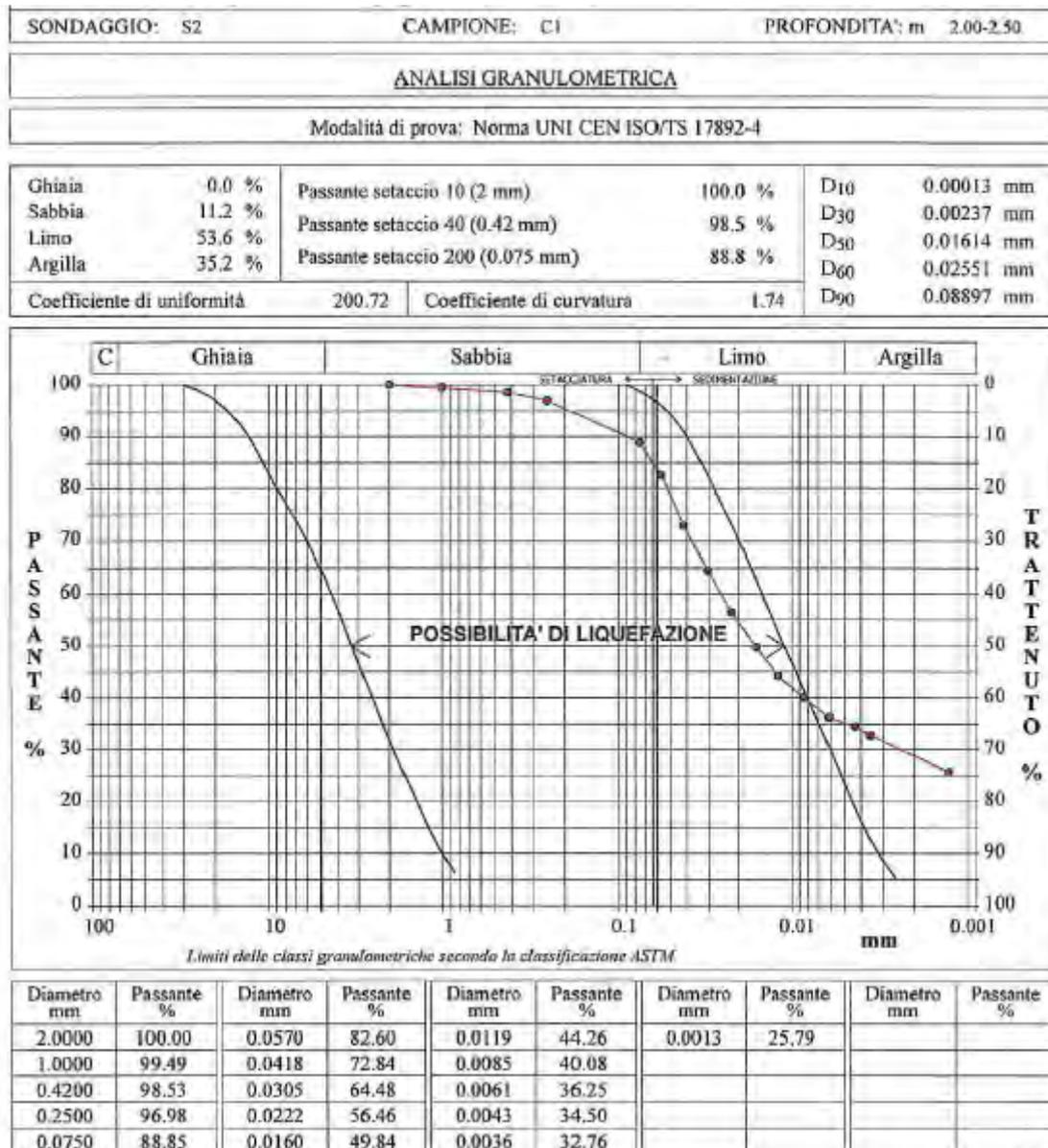


Fig. 6.4.1.1: Curva granulometrica campione indisturbato S2-C1.

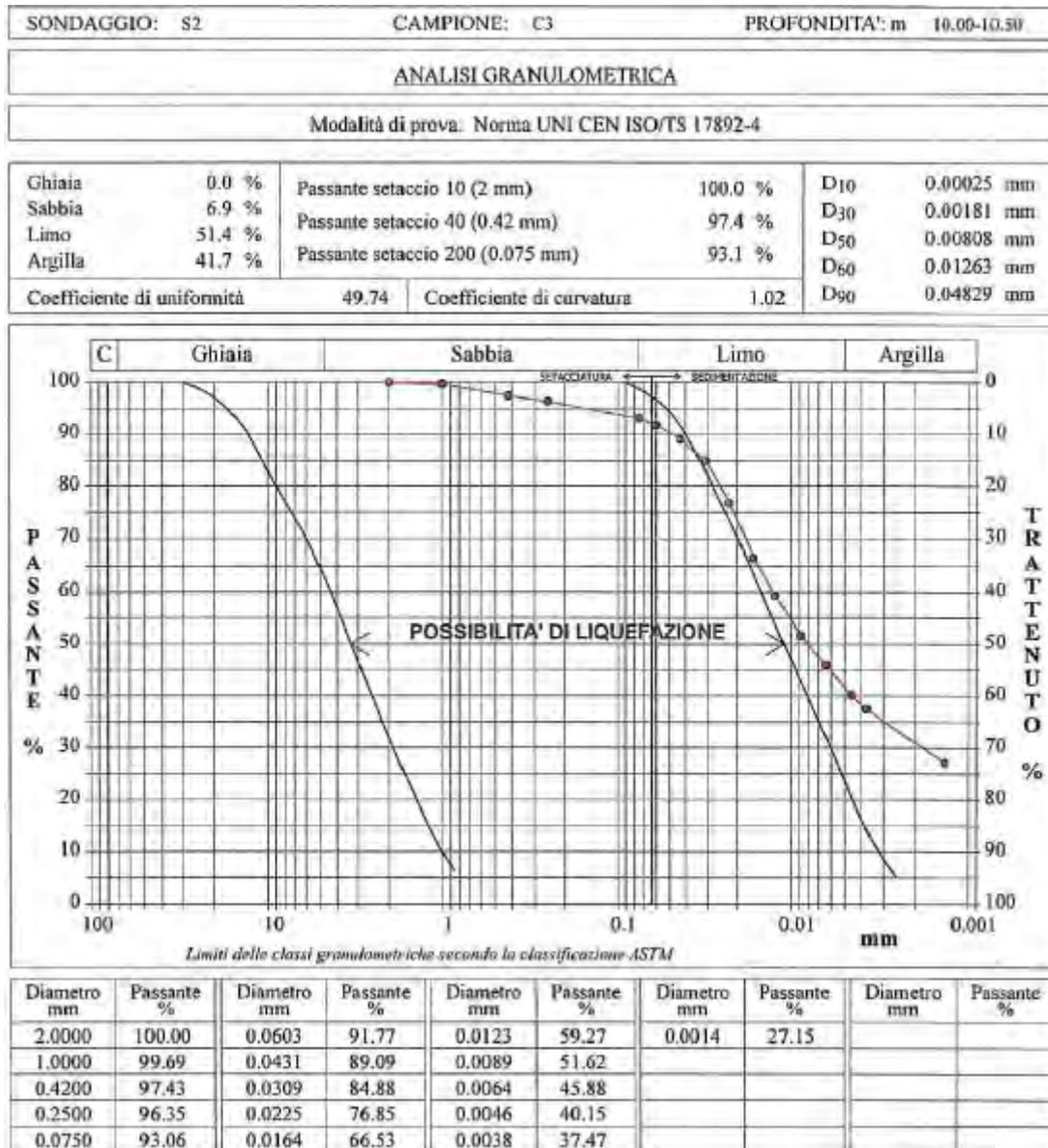


Fig. 6.4.1.2: Curva granulometrica campione indisturbato S2-C3.

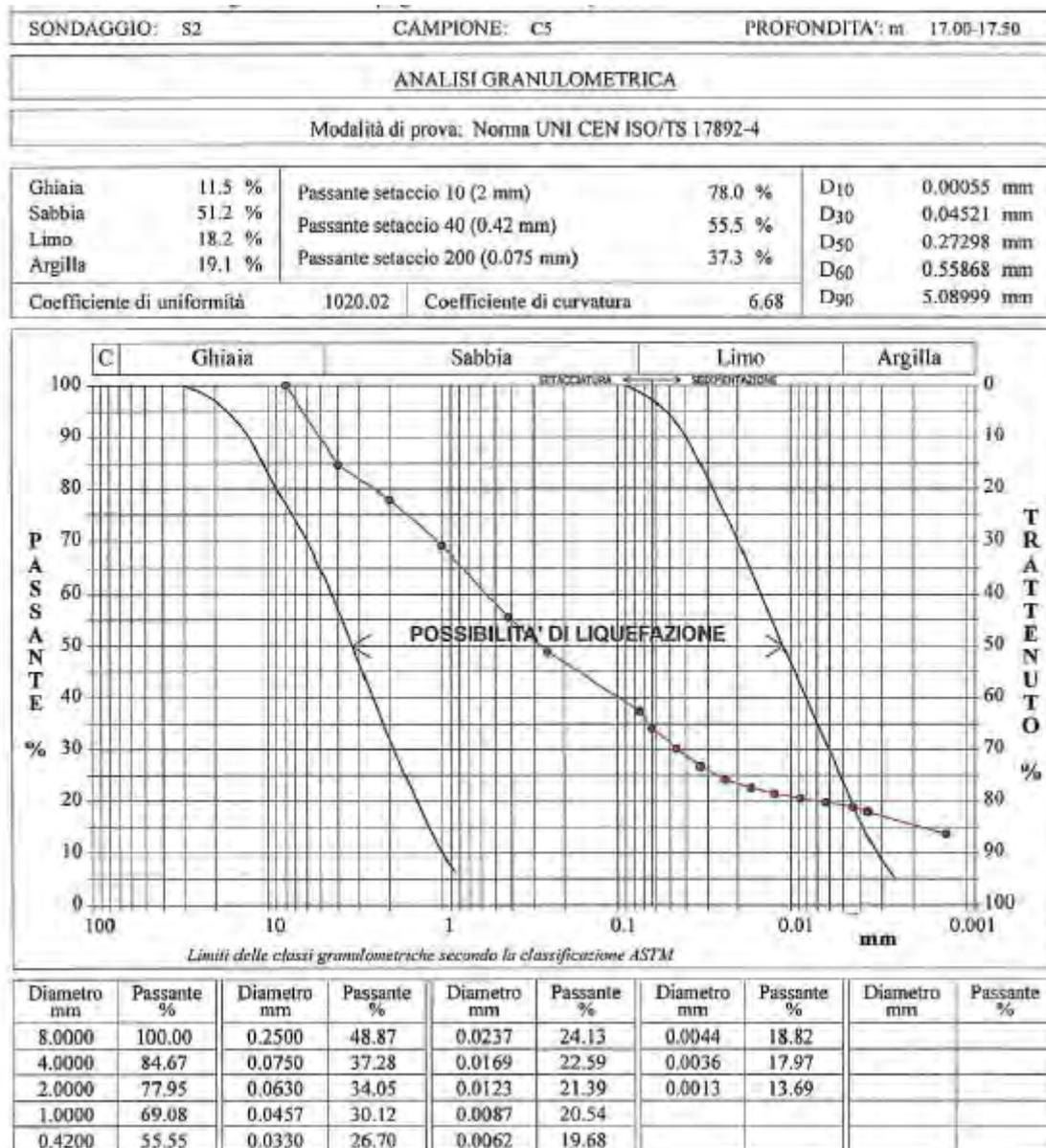


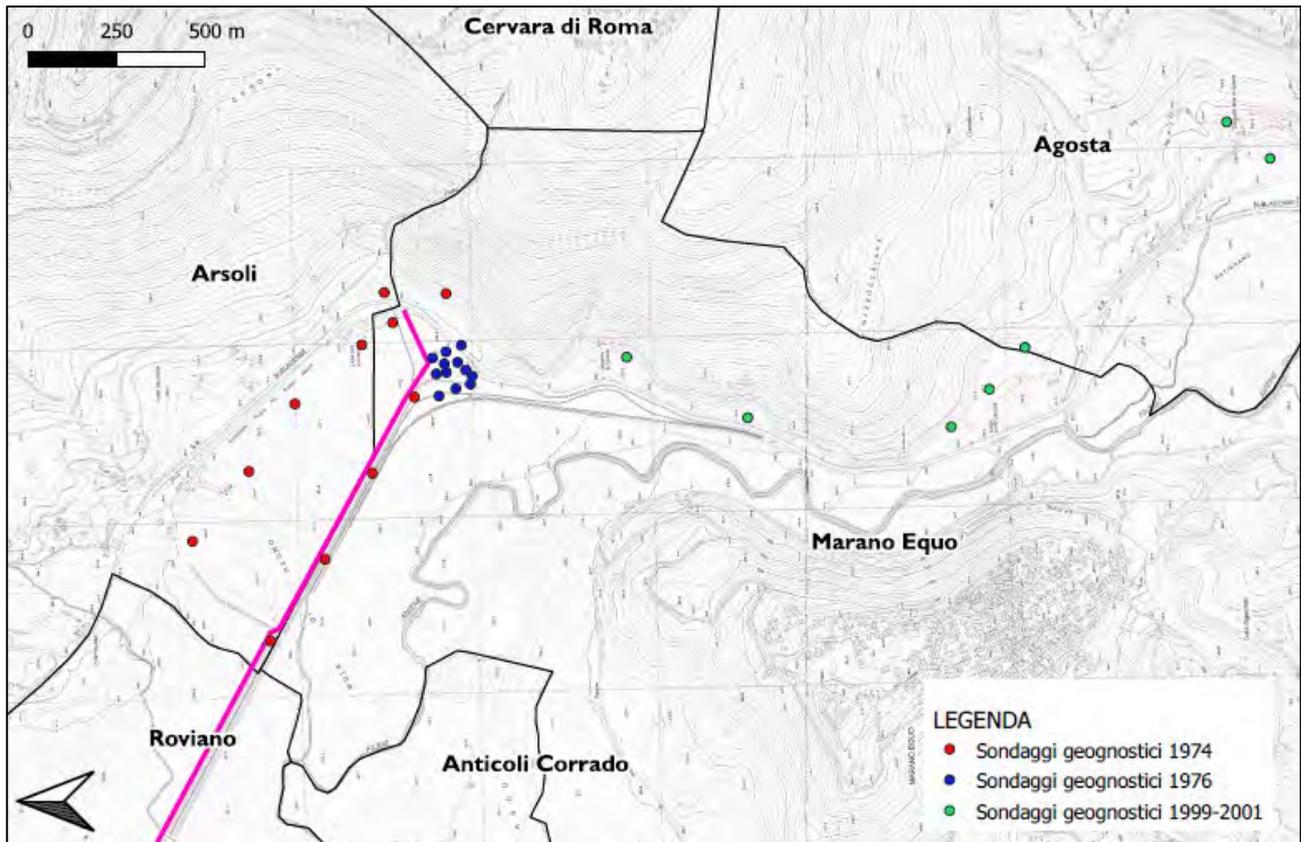
Fig. 6.4.1.3: Curva granulometrica campione indisturbato S2-C5.

7. Indagini geognostiche e geofisiche

A supporto della definizione del modello geologico delle aree relative alle opere di progetto, si è provveduto alla ricerca della documentazione storica riguardante una serie di campagne di indagini geognostiche a supporto sia della progettazione dell'acquedotto esistente che ad altre opere presenti nel territorio in esame.

Nel dettaglio, come osservabile nella figura seguente, si possono sintetizzare 3 differenti campagne di indagini geognostiche:

1. Indagini geognostiche del 1974 (n. 11 sondaggi geognostici);
2. Indagini geognostiche del 1976 (n. 12 sondaggi geognostici);
3. Indagini geognostiche 1999-2001 (n. 7 sondaggi geognostici).



Le stratigrafie ricostruite sulla verticale dei sondaggi pregressi confermano in linea generale l'assetto geologico evidenziato dalla cartografia geologica disponibile e del rilievo geologico di campagna. In allegato si riportano in dettaglio i logs stratigrafici.

I dati preesistenti sono stati successivamente integrati con una mirata campagna di indagini geognostiche e geofisiche, come riportato e descritto nei seguenti paragrafi, volta a definire l'assetto geologico più nel dettaglio, ed è stata articolata come di seguito riportato:

- Esecuzione di n. 13 sondaggi geognostici spinti fino ad una profondità compresa tra 30 e 64 m dal p.c.; n. 7 perfori di sondaggio sono stati attrezzati con tubazione piezometrica, n. 6 perfori di sondaggio sono stati attrezzati con tubazione per prova Down-Hole;

- Prelievo di campioni indisturbati, rimaneggiati e spezzoni di roccia, da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico per la determinazione delle caratteristiche fisico-meccaniche per i terreni e le rocce;
- Esecuzione di prove S.P.T. (*Standard Penetration Test*) per la determinazione, in primo luogo, dello stato di addensamento e dei parametri di resistenza per terreni a comportamento granulare;
- Esecuzione di prove pressiometriche, per esprimere il rapporto pressione-volume totale e pressione-aumento di volume corrispondente;
- Prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc per la valutazione delle caratteristiche idrauliche in foro alle diverse profondità indagate (conducibilità idraulica k);

Per un maggior dettaglio, circa l'ubicazione delle indagini geognostiche e geofisiche, si rimanda agli elaborati grafici "*Planimetria con indicazioni delle indagini eseguite*". I report delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite sono presenti in allegato.

Piano di indagine integrativo

Per le opere di progetto che risultano attualmente distanti dalle indagini realizzate, è stato predisposto un piano indagini integrativo da realizzarsi entro la prossima fase progettuale che sarà articolato come di seguito illustrato e che avrà l'obiettivo di definire un modello geologico-tecnico di dettaglio per ciascun manufatto:

- Esecuzione di n. 2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo nei pressi dei manufatti TR4PZ1 e TR4PZ2 spinti almeno fino a 30 m dal p.c.; i perfori di sondaggio saranno attrezzati con tubazione piezometrica fino a fondo foro; durante le attività di perforazione verranno prelevati campioni indisturbati da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico per la loro caratterizzazione chimico-fisica e meccanica, prove SPT e prove di permeabilità;
- Esecuzione di prospezioni sismiche MASW come di seguito collocate: n. 2 nei pressi del manufatto TR4PZ1, n. 2 nei pressi del manufatto TR4PZ2, n. 2 nei pressi del manufatto TR4PZ5, n. 2 nei pressi del manufatto TR4PZ7 (manufatto interconnessione), n. 2 nei pressi del manufatto TR2PZ1;
- Esecuzione di n. 3 prospezioni sismiche a rifrazione con tecnica tomografica nei pressi del manufatto TR4PZ7 (manufatto interconnessione);

- Esecuzione di misure di frequenza fondamentale (HVSR) come di seguito collocate: n. 1 nei pressi del manufatto TR4PZ1, n. 1 nei pressi del manufatto TR4PZ2, n. 1 nei pressi del manufatto TR4PZ5 n. 1 nei pressi del manufatto TR4PZ7 (manufatto interconnessione), n. 1 nei pressi del manufatto TR2PZ1;
- Esecuzione di prove penetrometriche dinamiche (DPSH) spinte fino a rifiuto strumentale come di seguito collocate: n. 2 nei pressi del manufatto TR4PZ5, n. 3 nei pressi del manufatto TR4PZ7 (manufatto interconnessione), n. 2 nei pressi del manufatto TR2PZ1;
- Esecuzione di prove penetrometriche statiche (CPTu) spinte fino a rifiuto strumentale come di seguito collocate: n. 2 nei pressi del manufatto TR4PZ5, n. 3 nei pressi del manufatto TR4PZ7 (manufatto interconnessione); n. 1 nei pressi del manufatto TR2PZ1.

7.1 Stratigrafie dei sondaggi

Le stratigrafie ricostruite sulla verticale dei sondaggi a carotaggio continuo eseguiti confermano in linea generale l'assetto geologico evidenziato dalla cartografia geologica disponibile e del rilievo geologico di campagna. In allegato si riportano in dettaglio i report dei sondaggi geognostici eseguiti.

7.2 Prove geotecniche di sito

Le prove di sito vengono effettuate direttamente sul terreno o nei fori di sondaggio al fine di ottenere una serie di parametri fisici e meccanici riguardanti sia le terre che le rocce. Queste prove hanno una notevole importanza in quanto, attraverso i parametri ricavati, è possibile caratterizzare il comportamento del terreno nell'intorno delle condizioni naturali in cui si trova, andando generalmente a valutare un volume più ampio di quello analizzabile in laboratorio. Nel seguente paragrafo verranno illustrati e discussi i risultati derivanti dalle prove di sito realizzate nel corso della campagna geognostica effettuata.

7.2.1 Monitoraggio piezometrico

La campagna di indagini geognostiche ha previsto l'installazione di piezometri a tubo aperto fino a fondo foro all'interno di n. 7 fori di sondaggio, in particolare nei sondaggi S3, S4, S8, S9, S12, S13, S14.

Si rimanda al paragrafo "4.2.4 Analisi idrogeologica quantitativa – Misurazione e ricostruzione piezometrica" per una più dettagliata descrizione del monitoraggio piezometrico effettuato.

7.2.2 Standard Penetration Test (S.P.T.)

La prova S.P.T. rappresenta una prova a percussione dinamica e standardizzata secondo le modalità contenute nella norma ASTM D1586/67.

Questa tipologia di prova fornisce informazioni sulla stratigrafia del terreno e stime empiriche sulle proprietà meccaniche dei materiali attraversati. La soluzione adottata per stimare i parametri geotecnici si è rivelata essere quella che presenta una suddivisione generale dei materiali investigati in terreni granulari e terreni coesivi.

Dal valore di N_{spt} , tramite le correlazioni di tipo empirico mostrate nelle Tabelle 7.2.2.1 e 7.2.2.2, rispettivamente riferite ai terreni granulari e ai terreni coesivi, sono state ottenuti i seguenti parametri:

- Descrizione dello stato di addensamento, densità relativa D_r (%) e angolo di attrito φ (°) per i materiali granulari.

Tabella 7.2.2.1: Stima dei parametri geotecnici fondamentali dei terreni granulari a partire dal valore N_{spt} .

Stato di addensamento	N_{spt}	D_r (%)	φ (°)
Terreno incoerente			
Molto sciolto	< 4	< 0,2	< 30°
Sciolto	4 + 10	0,2 + 0,4	30° + 35°
Medio	10 + 30	0,4 + 0,6	35° + 40°
Denso	30 + 50	0,6 + 0,8	40° + 45°
Molto denso	> 50	> 0,8	> 45°

- Descrizione dello stato di consistenza, indice di consistenza I_c e coesione non drenata C_u per i materiali coesivi.

Tabella 7.2.2.2: Stima dei parametri geotecnici fondamentali dei terreni coesivi a partire dal valore N_{spt} .

<i>Definizione della consistenza</i>	<i>Numero dei colpi N (S.P.T.)</i>	<i>Indice di consistenza I_c</i>	<i>Coesione non drenata C_u (bar)</i>
Terreno coerente			
Molto soffice	< 2	- 0	< 0,1
Soffice	2 + 4	0 + 0,25	0,1 + 0,25
Plastico	4 + 8	0,25 + 0,5	0,25 + 0,5
Duro	8 + 15	0,5 + 0,75	0,5 + 1,0
Molto duro	15 + 30	0,75 + 1,0	1,0 + 2,0
Durissimo	> 30	> 1,0	> 2,0

Essendo i valori tabellati in range, e volendo ottenere numeri interi, utili specialmente per le valutazioni statistiche e grafiche, è stata adottata la seguente logica nell'attribuzione dei parametri (D_r , ϕ , I_c , C_u): per valori di N_{spt} compatibili con l'intorno inferiore del range si è preso il valore minimo, per valori di N_{spt} compatibili con l'intorno superiore del range il valore massimo, per valori intermedi di N_{spt} nel range di riferimento il valore medio.

I risultati delle prove SPT (rappresentati dal valore assoluto N_{spt}) sono stati elaborati quindi al fine di ottenere, per i terreni granulari stime di densità relativa D_r (%) ed angolo di attrito ϕ ($^\circ$), mentre per i terreni coesivi stime di indice di consistenza I_c e coesione non drenata C_u . In Tabella 7.2.2.1 vengono riportati sia i risultati diretti della prova (N_{spt}), sia i parametri derivati.

Tabella 7.1.1.1 Risultati ed elaborazioni delle prove S.P.T.

Codice Sondaggio	Profondità da p.c.	Quota s.l.m	COLPI	NSPT	Descrizione litologica	Sigla CARG	Densità	Angolo di	Indice di	Coesione
							relativa	attrito	consistenza	non drenata
	m	m	n ₁ - n ₂ - n ₃	n°			Dr (%)	φ (°)	Ic	cu (kPa)
S2	3	367	6 7 7	14	Argille sabbiose	b			0.7	100
S2	7.2	362.8	3 5 5	10	Sabbie argillose	b	40	35		
S2	11	359	6 8 9	17	Sabbie grossolane argillose e debolmente limose con ghiaia	b	50	37		
S2	15	355	15 24 16	40	Sabbie grossolane argillose e debolmente limose con ghiaia	b	70	42		
S3	4.5	315.6	1 1 1	2	Alternanza di limi sabbiosi e breccie calcaree	b				
S3	12	308	5 8 7	15	Argilla con limo debolmente sabbiosa, a tratti debolmente ghiaiosa	b			0.75	100
S3 bis	7	315	1 2 2	4	Sabbie limose	b	20	30		
S3 bis	11.5	310.5	2 3 3	6	Sabbie limose	b	25	30		
S3 bis	14.5	307.5	3 4 3	7	Sabbie limose	b	30	33		
S3 bis	17	305	3 4 4	8	Sabbie limose	b	35	35		
S3 bis	19.5	302.5	4 4 4	8	Sabbie limose	b	35	35		
S3 bis	23.5	298.5	2 2 3	5	Sabbie limose	b	25	30		
S4	4.5	319.5	10 rif	rif	Breccia calcarea in matrice sabbiosa grossolana debolmente argillosa	b				
S4	13.5	310.5	1 1 1	2	Sabbia argillosa da poco consistente a sciolta ed inclusi calcarei	b	15	25		
S4	16.5	307.5	1 1 1	2	Sabbia argillosa da poco consistente a sciolta ed inclusi calcarei	b	15	25		
S4	19.7	304.3	2 1 3	4	Sabbia argillosa da poco consistente a sciolta ed inclusi calcarei	b	20	30		
S4	23.2	300.8	10 12 9	21	Argilla debolmente sabbiosa da poco a mediamente consistente	b			0.9	150

RELAZIONE GEOLOGICA

Codice Sondaggio	Profondità da p.c.	Quota s.l.m	COLPI	NSPT	Descrizione litologica	Sigla CARG	Densità relativa	Angolo di attrito	Indice di consistenza	Coesione non drenata
	m	m	n ₁ - n ₂ - n ₃	n°			Dr (%)	φ (°)	Ic	cu (kPa)
S6	2.3	317.7	10 18 8	26	Sabbia da media a grossolana con poco limo e abbondanti ciottoli calcarei	b	55	38		
S6	7.3	312.7	21 11 13	24	Argilla limosa da mediamente consistente a consistente	b			0.9	150
S6	10.1	309.9	28 rif	rif	Breccia calcarea con ciottoli, molto addensata	b				
S6	12.2	307.8	31 44 rif	rif	Breccia calcarea con ciottoli, molto addensata	b				
S6	21.9	298.1	39 rif	rif	Alternanza di calcare fratturato e breccia calcarea	b				
S6	28	292	rif	rif	Alternanza di calcare fratturato e breccia calcarea	b				
S8	3.5	314.5	6 8 8	16	Limo argilloso mediamente consistente con inclusi ciottoli calcarei	b			0.8	100
S8	7.5	310.5	4 6 5	11	Limo argilloso mediamente consistente con inclusi ciottoli calcarei	b			0.6	80
S8	12	306	12 31 20	51	Sabbia calcarea, probabilmente travertinosa	b	80	45		
S8	18	300	33 20	rif	Sabbia calcarea, probabilmente travertinosa	b				
S9	11.3	311.7	50 20	rif	Sabbie limose e limi sabbiosi da poco a mediamente consistenti con inclusioni di elementi eterometrici calcarei	b				
S12	3.5	316.5	2 4 3	7	Argilla limosa mediamente consistente	b			0.4	40
S12	6.5	313.5	6 6 8	14	Sabbia travertinosa con ghiaia limosa da poco a mediamente addensata	b	45	35		
S12	9.5	310.5	3 4 3	7	Limo con sabbia debolmente argilloso e ghiaioso da poco a mediamente consistente	b			0.4	40
S12	11.5	308.5	3 5 6	11	Limo con sabbia debolmente argilloso e ghiaioso da poco a mediamente consistente	b			0.6	80
S12	15	305	2 2 3	5	Limo con sabbia debolmente argilloso e ghiaioso da poco a mediamente consistente	b			0.3	30
S12	17.5	302.5	21 27 35	62	Ghiaia eterometrica da sub-arrotondata a spigolosa in matrice argilloso-limosa	b	85	50		
S13	2.3	312.7	21 10 19	29	Ghiaia sub-arrotondata in matrice limoso-sabbiosa, da mediamente a molto addensata	b	60	40		
S13	6	309	10 9 12	21	Limo sabbioso poco consistente	b			0.9	150
S13	10	305	3 4 4	8	Sabbie travertinose mediamente addensate	b	35	35		
S13	13.8	301.2	6 4 10	14	Ghiaia sub-arrotondata in matrice limosa	b	45	35		
S13	17.5	297.5	2 5 7	12	Ghiaia sub-arrotondata in matrice limosa	b	45	35		
S13	21	294	10 25 24	49	Alternanza di ghiaia eterometrica sub-arrotondata e sabbioni	b	80	45		

RELAZIONE GEOLOGICA

Codice Sondaggio	Profondità da p.c.	Quota s.l.m	COLPI	NSPT	Descrizione litologica	Sigla CARG	Densità relativa	Angolo di attrito	Indice di consistenza	Coesione non drenata
	m	m	n ₁ - n ₂ - n ₃	n°			Dr (%)	φ (°)	Ic	cu (kPa)
S14	3	321	4 5 6	11	Sabbie limose e limi sabbiosi da poco a mediamente consistenti	b	40	30		
S14	6	318	3 4 4	8	Sabbie limose e limi sabbiosi da poco a mediamente consistenti	b	35	35		
S14	10.2	313.8	8 12 19	31	Sabbie limose e ghiaiose con elementi calcarei di dimensioni centimetriche	b	60	40		
S14	26	298	8 10 11	21	Sabbie a grana grossolana ben classate e poco addensate	b	50	37		
S14 bis	2	321	4 4 5	9	Sabbia limosa e limoso sabbioso, da poco a mediamente addensata consistente	b	35	35		
S14 bis	4.4	318.6	4 5 7	12	Sabbia limosa e limoso sabbioso, da poco a mediamente addensata consistente	b	45	30		
S14 bis	7.2	315.8	21 28	rif	Brecce calcaree	b				
S14 bis	9.8	313.2	31	rif	Brecce calcaree	b				
S14 bis	11.5	311.5	9 11 11	22	Sabbie grossolane con ghiaia eterogenea a spigoli vivi, mediamente addensate	b	50	37		
S14 bis	13.1	309.9	10 8 9	17	Sabbie grossolane con ghiaia eterogenea a spigoli vivi, mediamente addensate	b	50	37		
S14 bis	15	308	20 18 21	39	Sabbie grossolane con ghiaia eterogenea a spigoli vivi, mediamente addensate	b	70	42		
S14 bis	18.5	304.5	10 10 9	19	Sabbie grossolane con ghiaia eterogenea a spigoli vivi, mediamente addensate	b	50	37		
S7	3.0	315	Rif	Rif	Ghiaia e sabbia grossolana	b	-	-		
S7	6.0	312	Rif	Rif	Ghiaia e sabbia grossolana	b	-	-		
S7	9.0	309	4-4-5	9	Argilla con limo sabbioso	b	-	-		
S7	13.5	302.5	Rif	Rif	Ghiaia e sabbia grossolana	b	-	-		
S7	21	297	Rif	Rif	Breccia calcarea	b	-	-		

Dai dati desunti, si evince che i terreni alluvionali presentano prevalentemente valori di Nspt generalmente inferiori a 30, tranne in rari casi (generalmente a profondità superiori ai 20 m) dove il valore di Nspt risulta elevato. È importante considerare come, nonostante la naturale eterogeneità litologica di questa Formazione, l'alto numero di dati raccolti consente di stimare un valore medio affidabile. Inoltre, si evince che le argille presentano un aumento del valore di Nspt abbastanza proporzionale in funzione della profondità, mentre i valori registrati per le sabbie, limi e ghiaie mostrano un'elevata variabilità causata proprio dall'eterogeneità litologica (spesso caratterizzata da percentuali variabili di materiale a granulometria più fine) riscontrata nelle alluvioni investigate e dallo stato di addensamento particolarmente eterogeneo.

Si evidenzia una marcata non attendibilità delle prove SPT2, SPT3 e SPT4 eseguite nel corso del sondaggio geognostico S4, in quanto queste ultime riportano valori di NSPT compresi tra 2 e 4. Inoltre, durante l'esecuzione del sondaggio geognostico S4 è stato prelevato il campione indisturbato C2 alla profondità compresa tra 18.0 e 18.3 m dal p.c. successivamente sottoposto a prove di laboratorio geotecnico. I risultati ottenuti da queste ultime mostrano come i terreni siano dotati di un moderato indice di consistenza, di discreti valori della coesione non drenata (pari a 56 kPa) derivanti da prove ELL ed a un valore del modulo edometrico, considerato alla pressione di sito, pari a 7.7 Mpa.

I valori N_{SPT} sopra citati risultano anomali rispetto a quanto descritto dalle prove di laboratorio geotecnico e rispetto a tutte le altre prove SPT eseguite in corrispondenza dei depositi alluvionali ed alle profondità di riferimento per le opere di progetto, motivo per il quale non verranno presi in considerazione tali valori perché con molta probabilità affetti da errore.

7.2.3 Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTu)

Le CPTu sono prove penetrometriche statiche che forniscono informazioni dettagliate sulla stratigrafia geotecnica del terreno sulla base dei seguenti parametri registrati in fase di esecuzione della prova:

- la resistenza all'avanzamento della punta (q_c);
- la resistenza dell'attrito laterale (f_s);
- la variazione pressione interstiziale (Δu);
- il friction ratio $FR\% = \frac{q_c}{f_s}$, con q_c resistenza alla punta e f_s resistenza dell'attrito laterale.

Le grandezze ottenute vengono poi normalizzate in modo tale da poter restituire il numero della classe di comportamento associata alla tipologia di terreno. Un metodo largamente utilizzato per determinare la tipologia di terreno a partire da parametri ottenuti con prove CPT è la classificazione di *Robertson 1990*, visibile nel grafico di Figura 7.2.3.1.

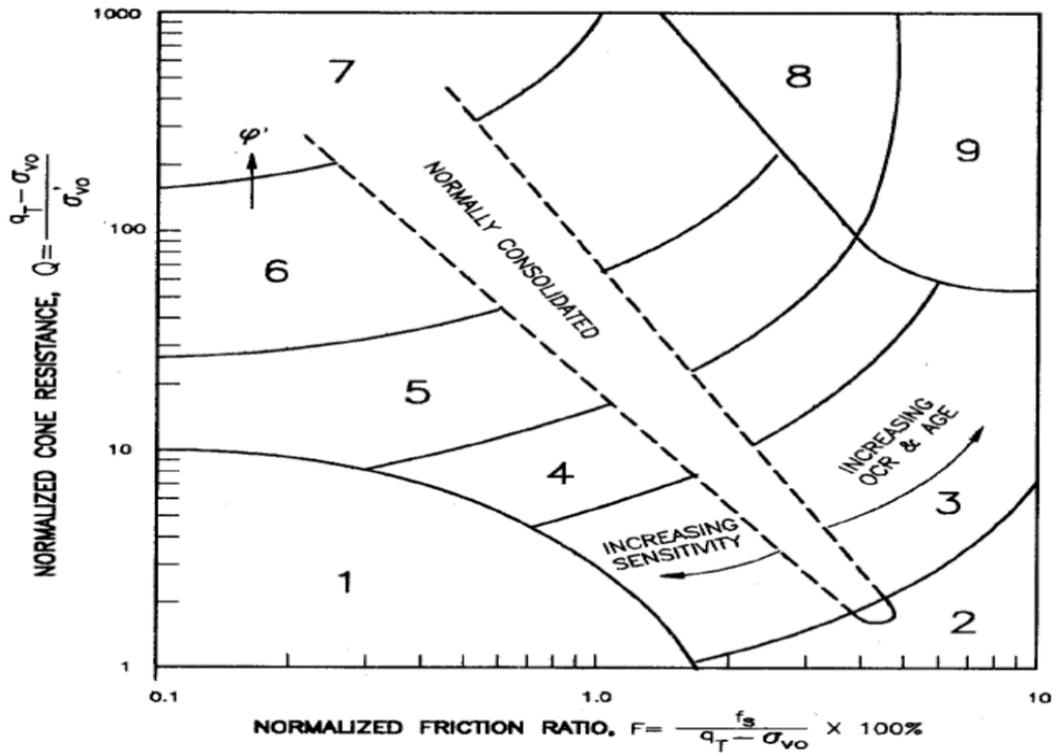


Fig. 7.2.3.1: Classificazione di Robertson (1990)

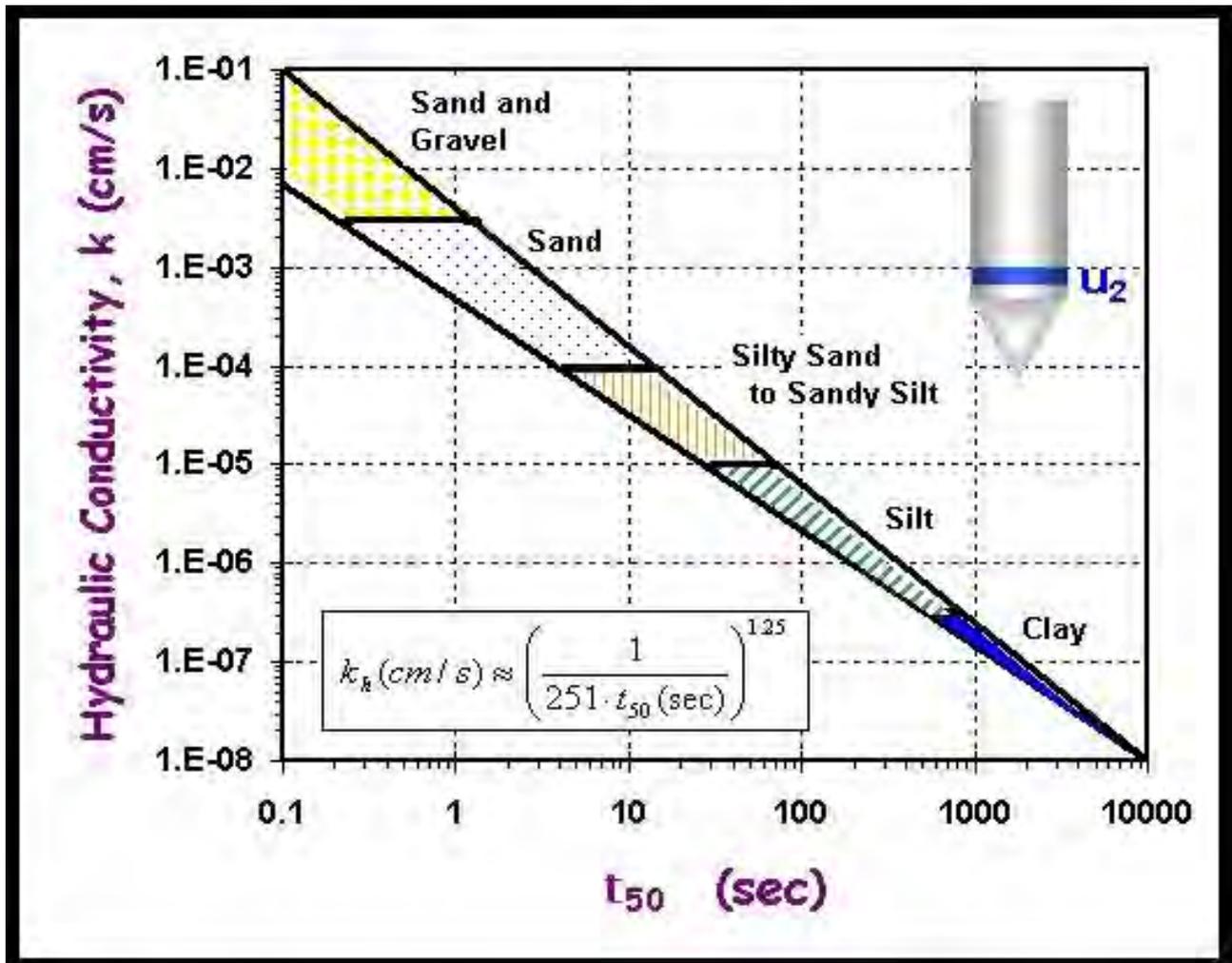
Con particolare riferimento alla prova CPTu, in cui viene utilizzato il piezocono, questo permette di misurare tramite il trasduttore di pressione, le variazioni delle pressioni dell'acqua nella zona porosa dello strumento: si misura la u preesistente alla profondità d'indagine a cui si aggiunge le sovrappressioni indotte in fase di avanzamento costante. La pressione indotta dalla punta produce un incremento della pressione interstiziale (Δu) che si dissipa in un certo tempo a seconda della permeabilità del materiale investigato. Per eseguire la prova di dissipazione viene arrestata la penetrazione ad una determinata profondità e si registra l'andamento nel tempo della pressione neutra; si esegue in quindi direttamente in sito, nel punto in cui è attivo il processo di smaltimento delle sovrappressioni dell'acqua indotte dalla rottura del terreno per attraversamento della punta.

Questa prova, essendo correlata al processo di consolidazione, permette di stimare i tempi necessari al terreno a dare una risposta deformativa, pertanto, è stato possibile ricavare il coefficiente di consolidazione orizzontale c_h tramite la formula (Robertson, 2010):

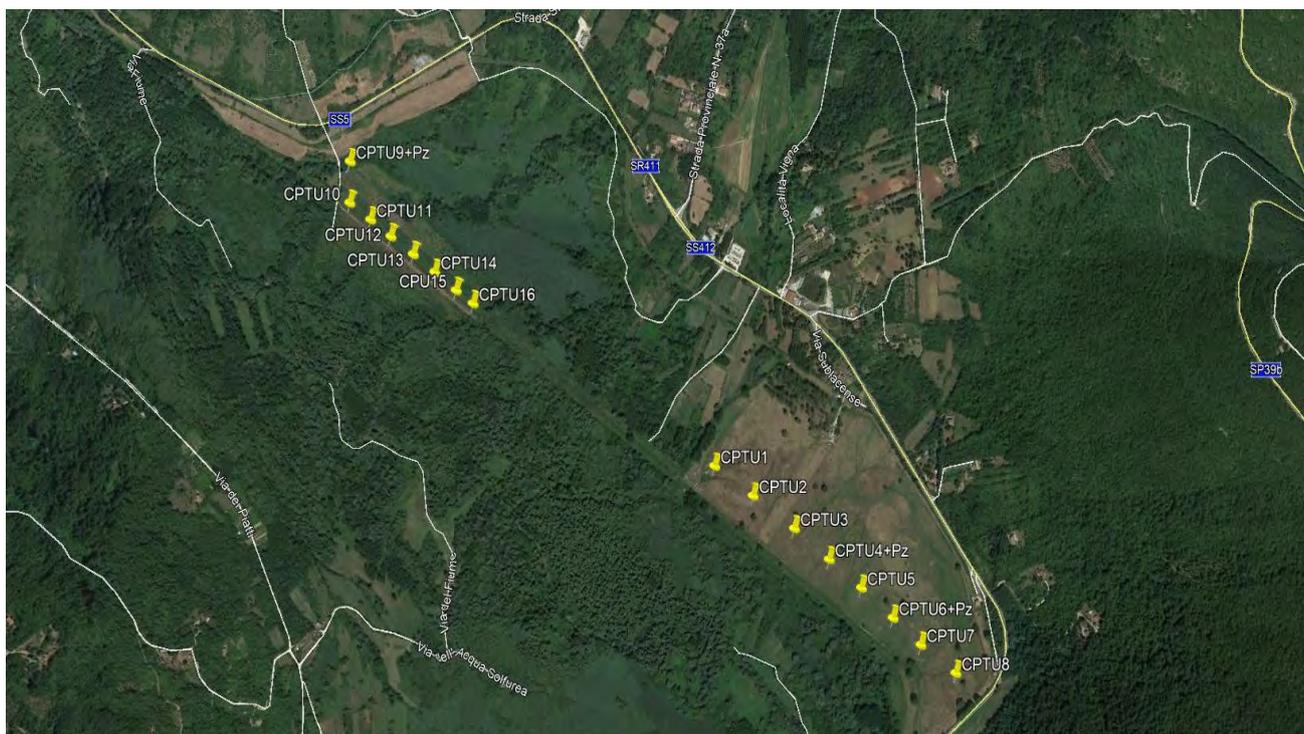
$$c_h = (1.67 \times 10^{-6}) 10^{-(1 - \log t_{50})}$$

t_{50} = tempo necessario a smaltire il 50% delle sovrappressioni dell'acqua iniziale.

Il grafico in Figura 7.2.3.2, riporta invece il metodo e l'equazione utilizzata per il calcolo del coefficiente di permeabilità orizzontale k_h (Parez e Fauriel, 1988).



Le CPTu effettuate nel tratto comune iniziale sono in totale 16 e sono state distribuite in due zone: dalla CPTU1 alla CPTU8 situate in località Mola di Regno, mentre dalla CPTU9 alla CPTU16 in località Pantano. Di seguito, in Figura 7.2.3.3, viene illustrata la rispettiva ubicazione.



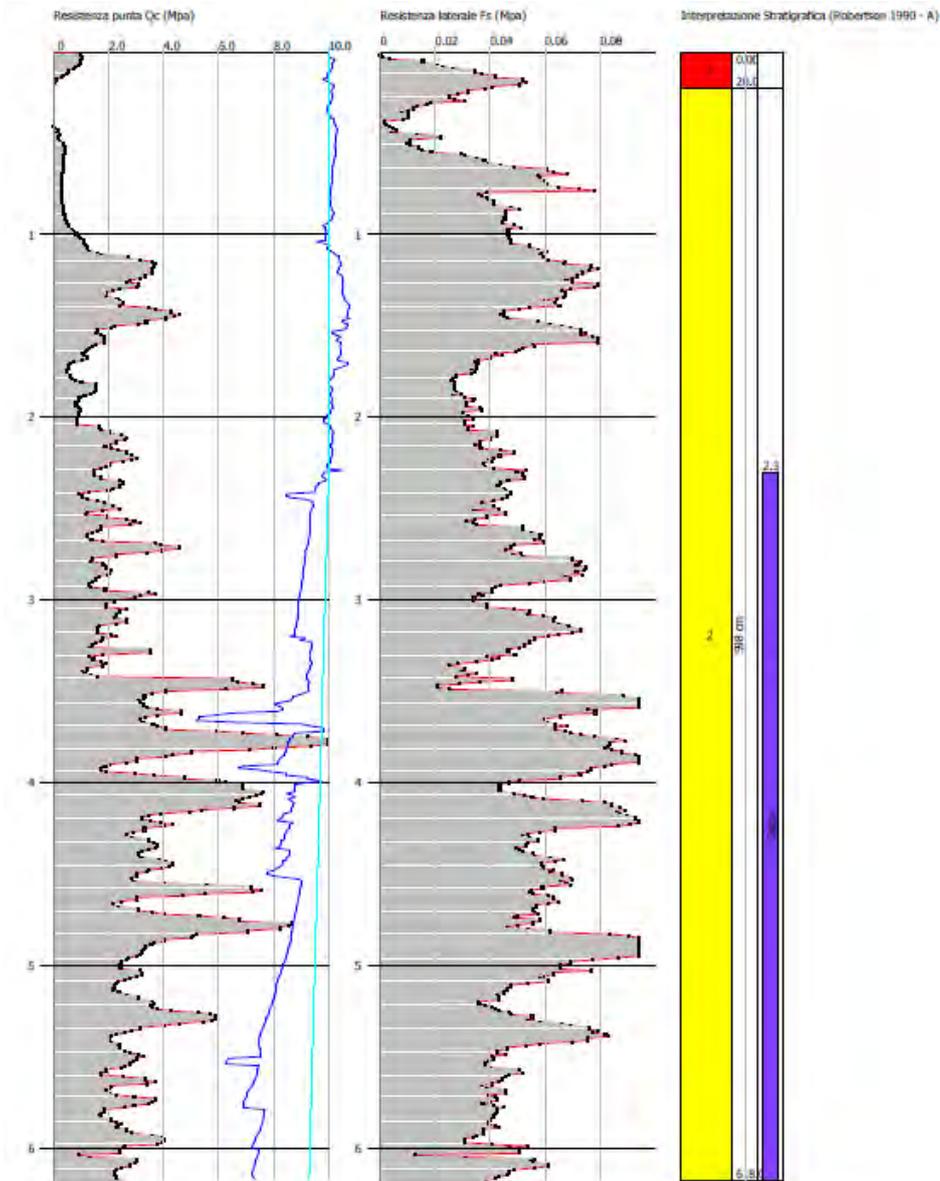
I risultati delle prove vengono esplicitati attraverso le relative tabelle fornite dall'impresa esecutrice e presenti nei report trasmessi.

Le grandezze riportate nei diagrammi risultanti sono:

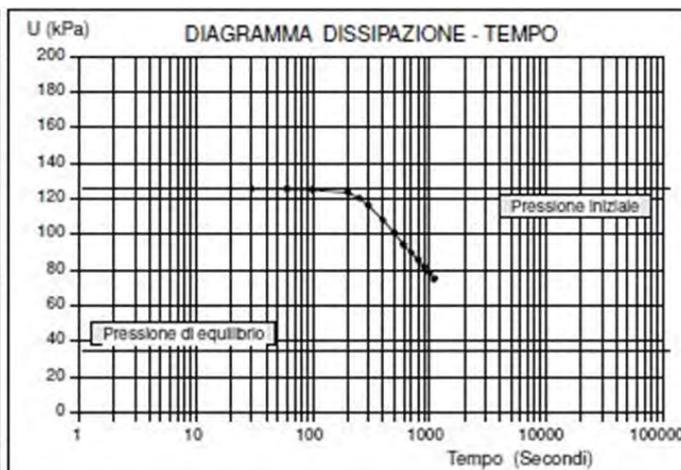
- la resistenza alla punta Q_c ;
- la resistenza all'attrito laterale F_s ;
- l'andamento delle pressioni interstiziali;
- la profondità del livello di falda.

Inoltre, viene fornita un'interpretazione stratigrafica basata sulla classificazione di *Robertson 1990*, da cui è stata ricavata ogni specifica stratigrafia geotecnica basata sui dati ottenuti. In Figura 7.2.3.4 sono riportate le stratigrafie delle 16 prove eseguite.

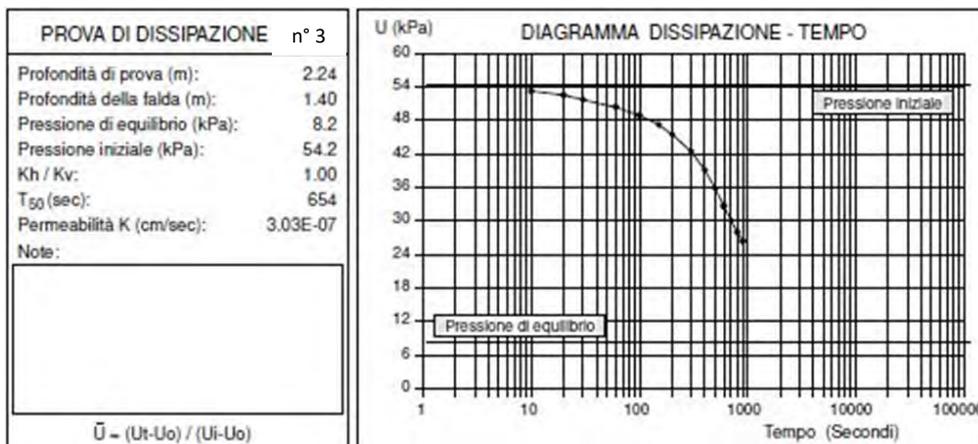
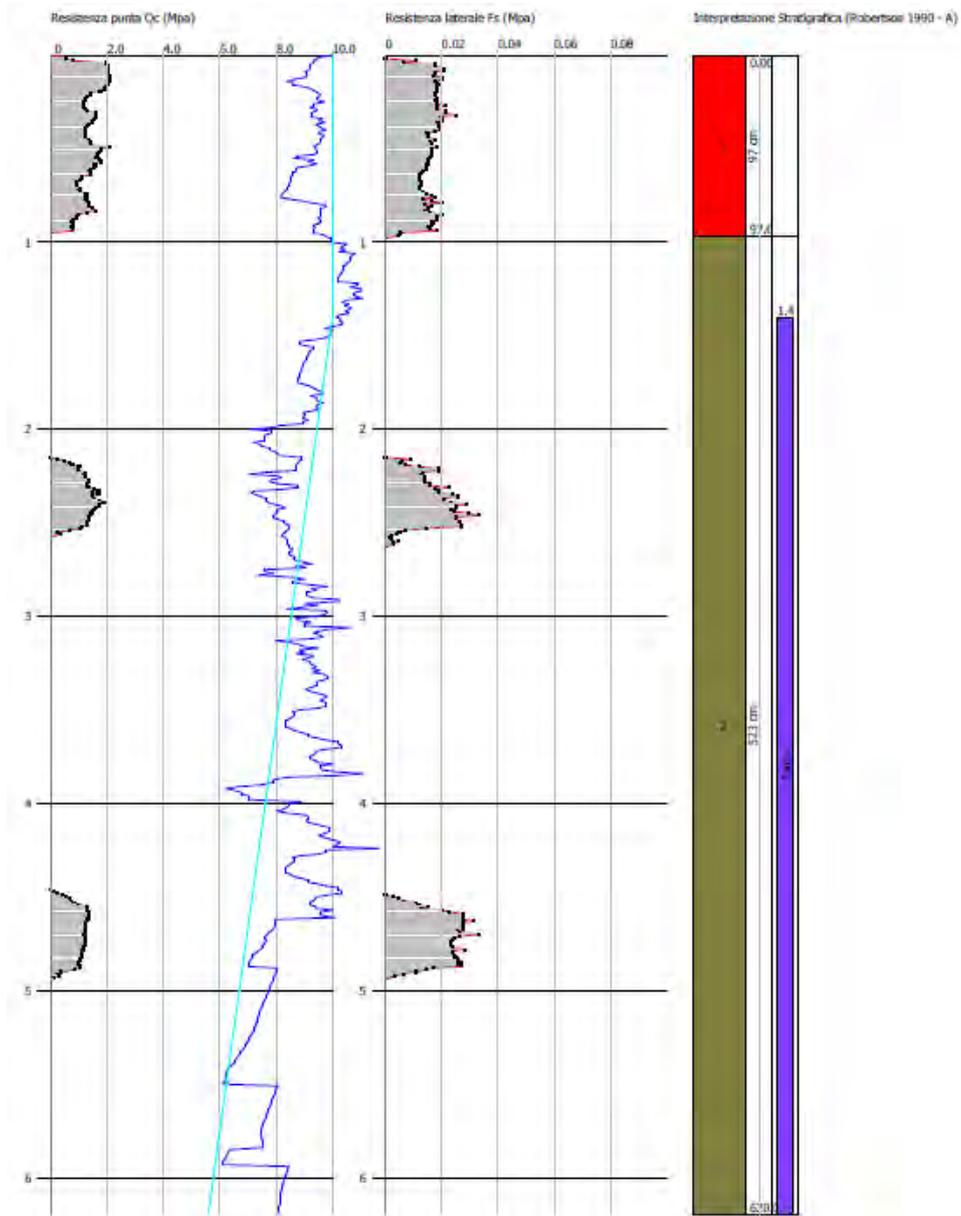
CPTu 2



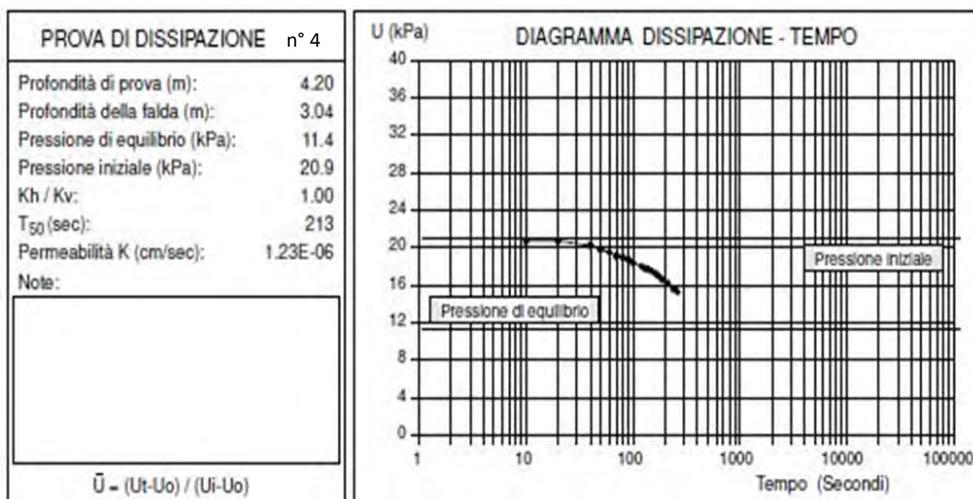
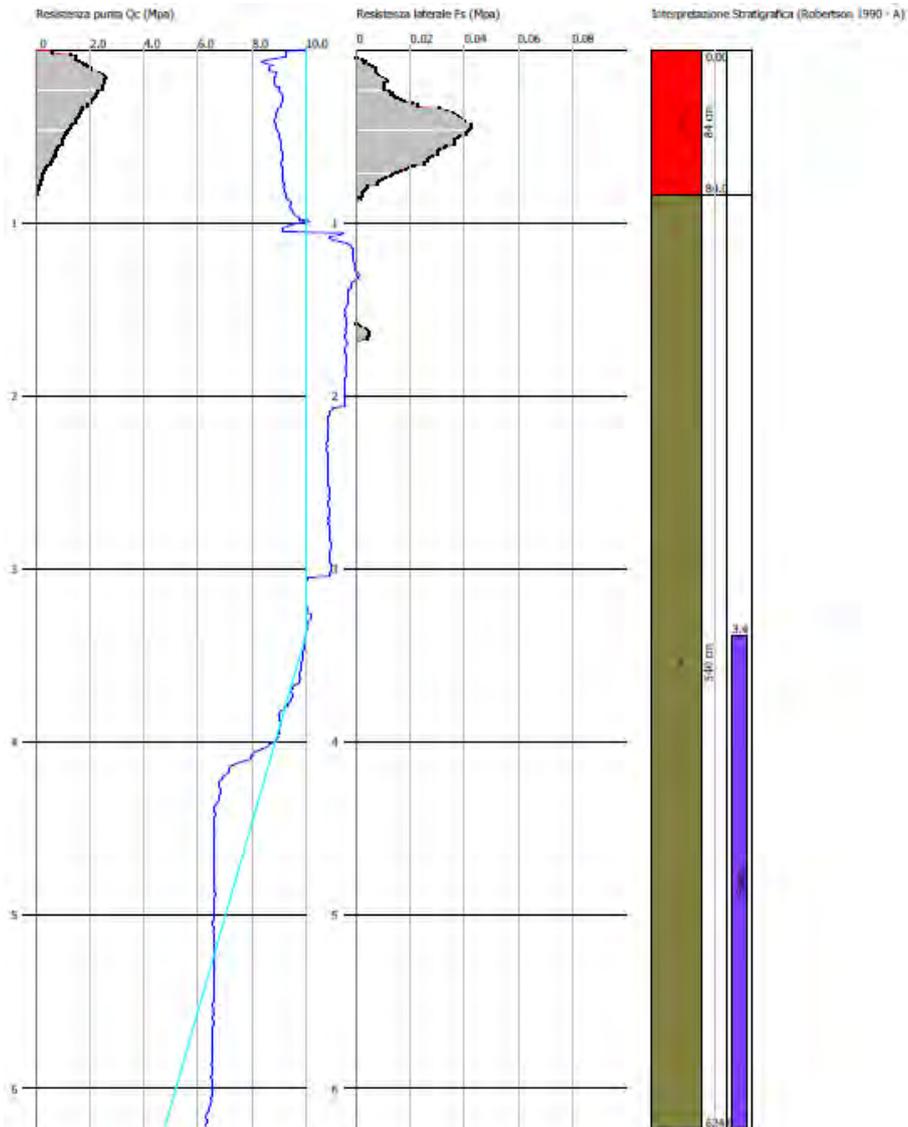
PROVA DI DISSIPAZIONE n° 2	
Profondità di prova (m):	5.80
Profondità della falda (m):	2.30
Pressione di equilibrio (kPa):	34.3
Pressione iniziale (kPa):	125.9
Kh / Kv:	1.00
T ₅₀ (sec):	945
Permeabilità K (cm/sec):	1.91E-07
Note:	
$\bar{U} = (U_t - U_o) / (U_i - U_o)$	



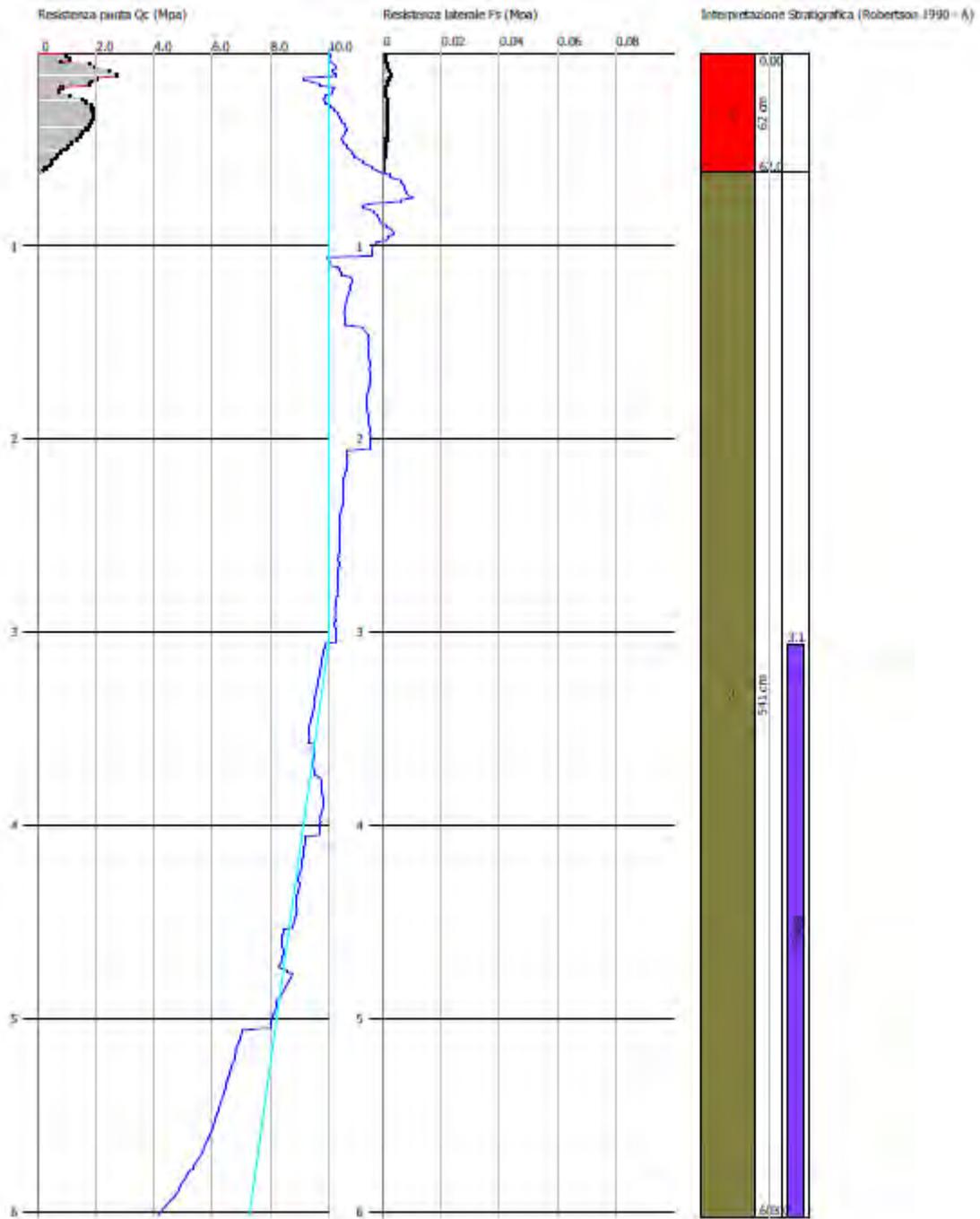
CPTu 3



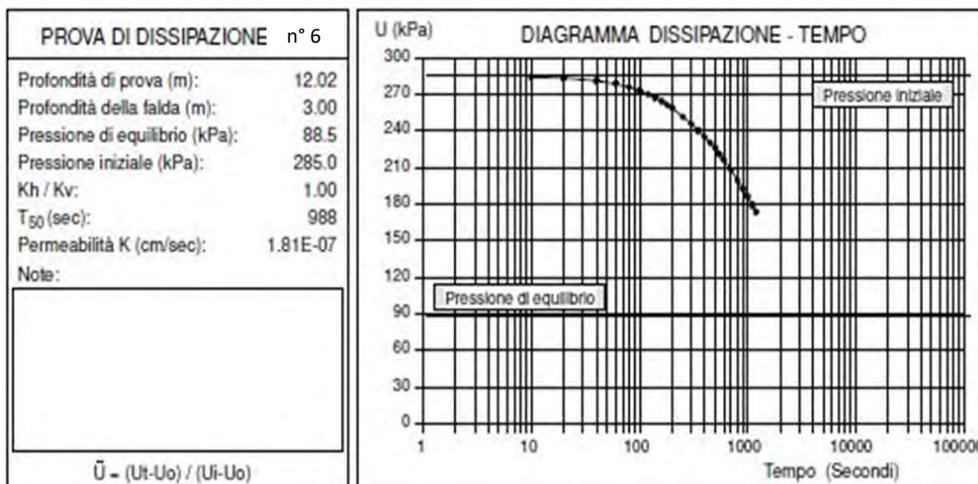
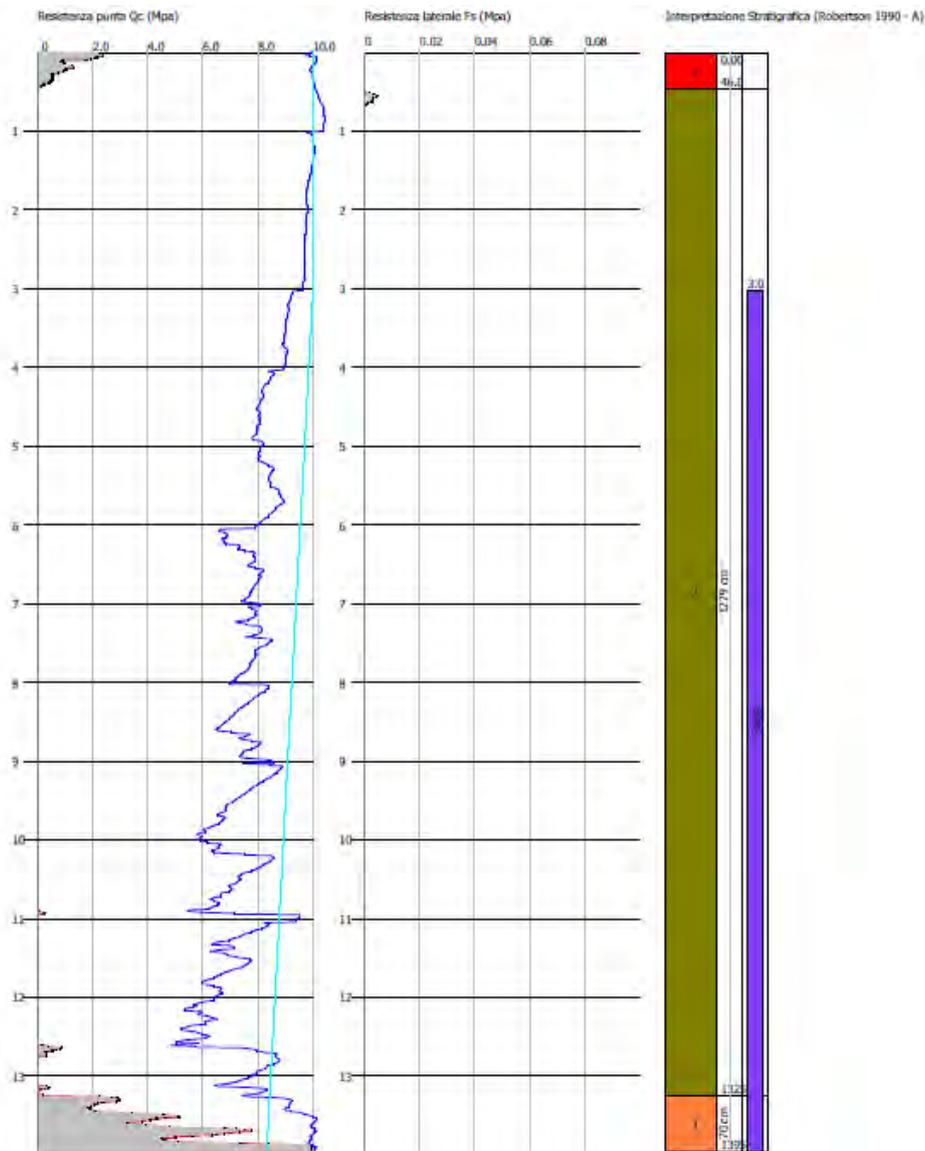
CPTu 4



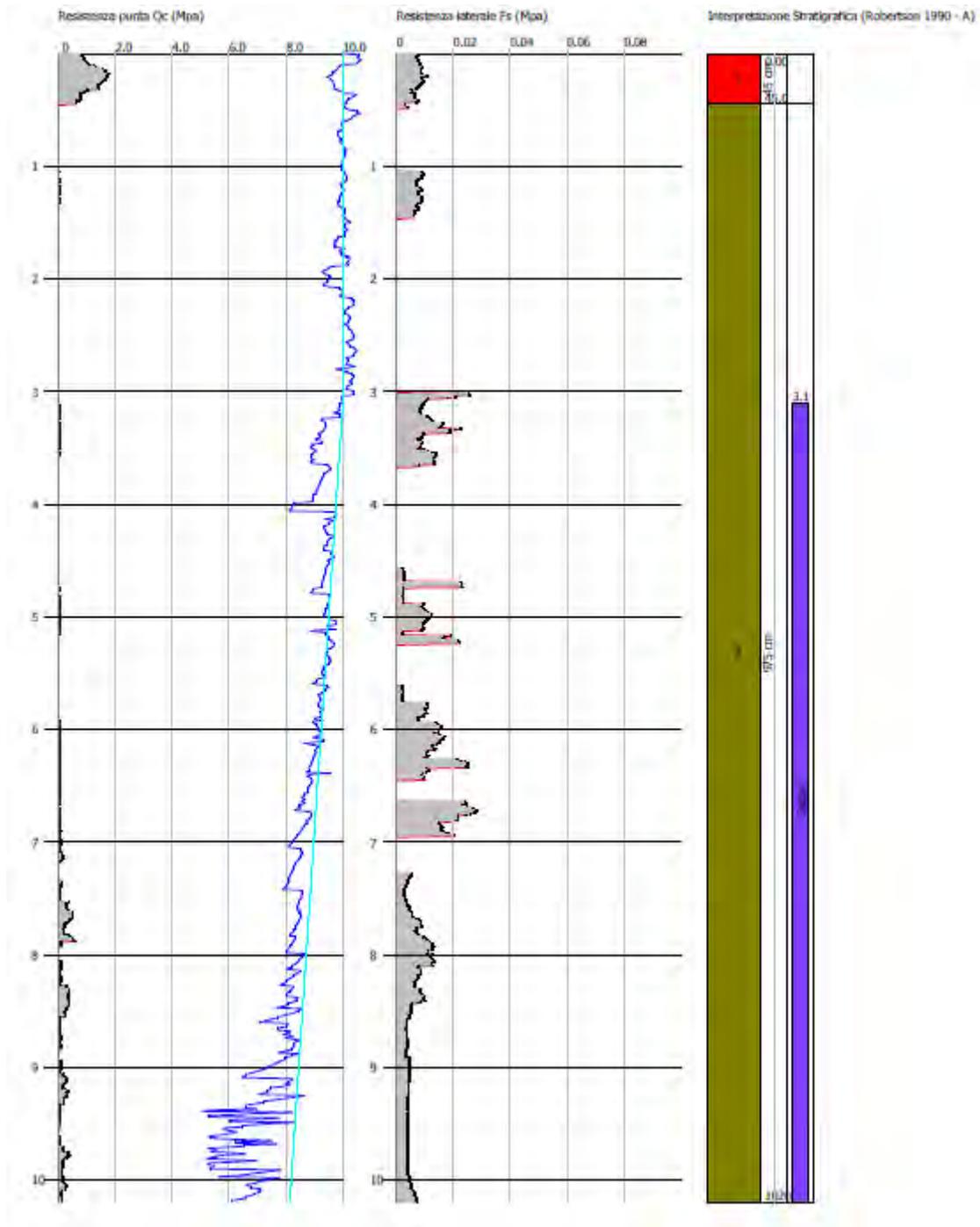
CPTu 5



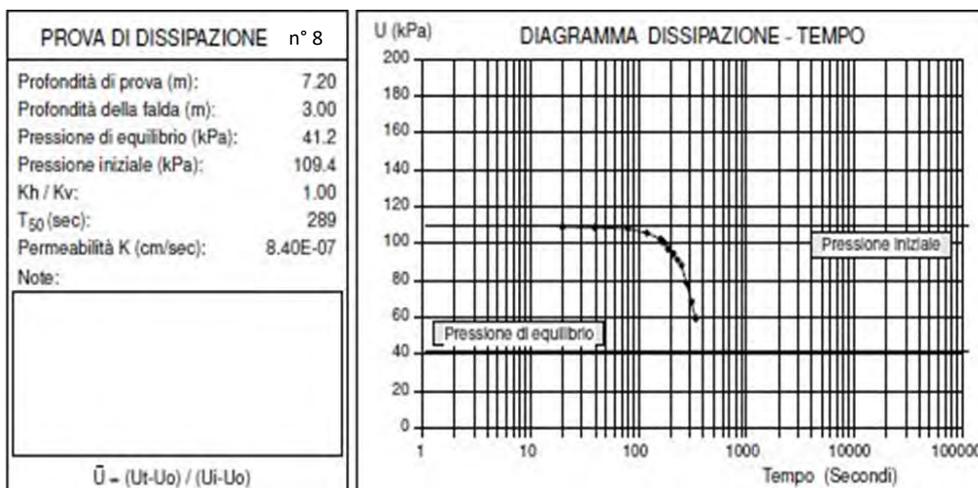
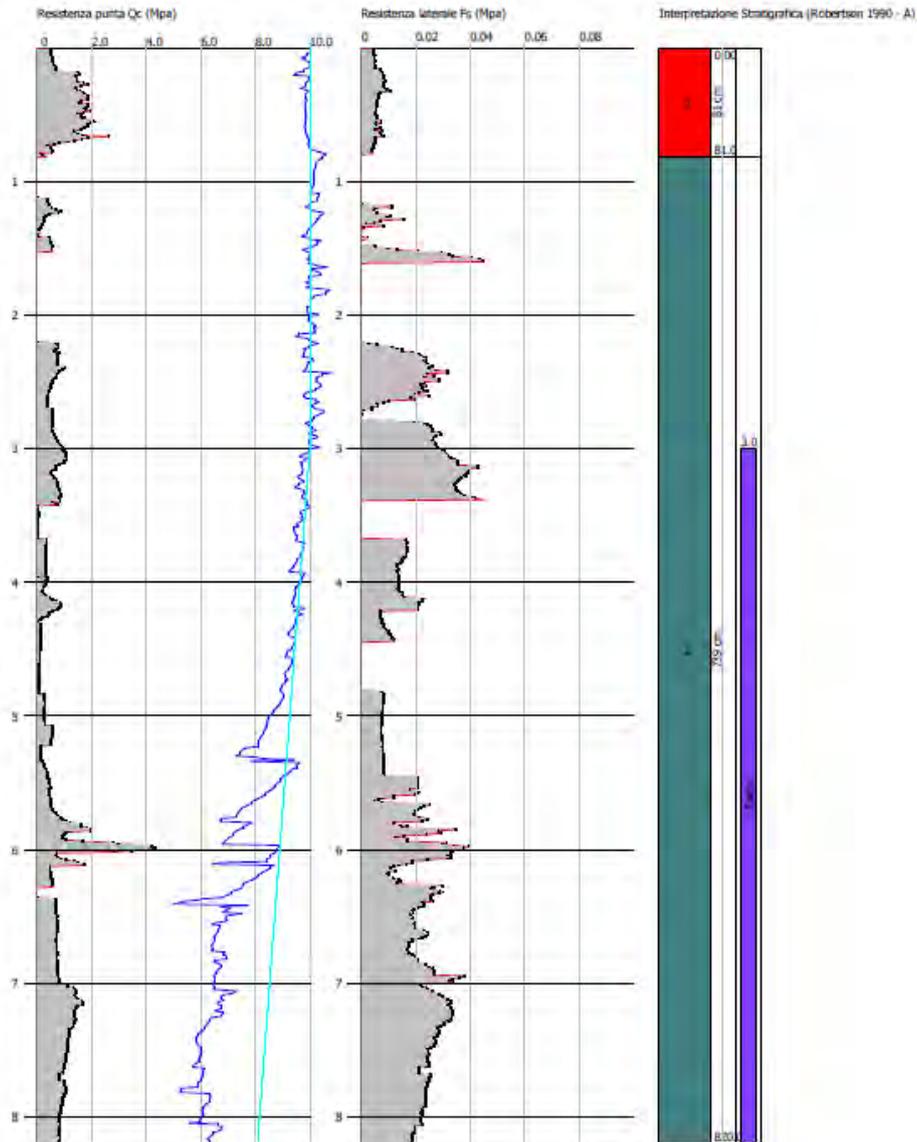
CPTu 6



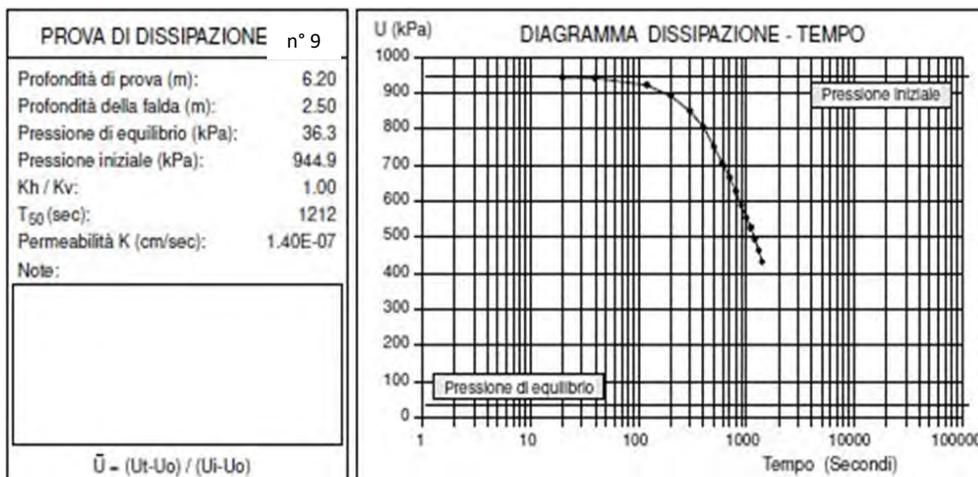
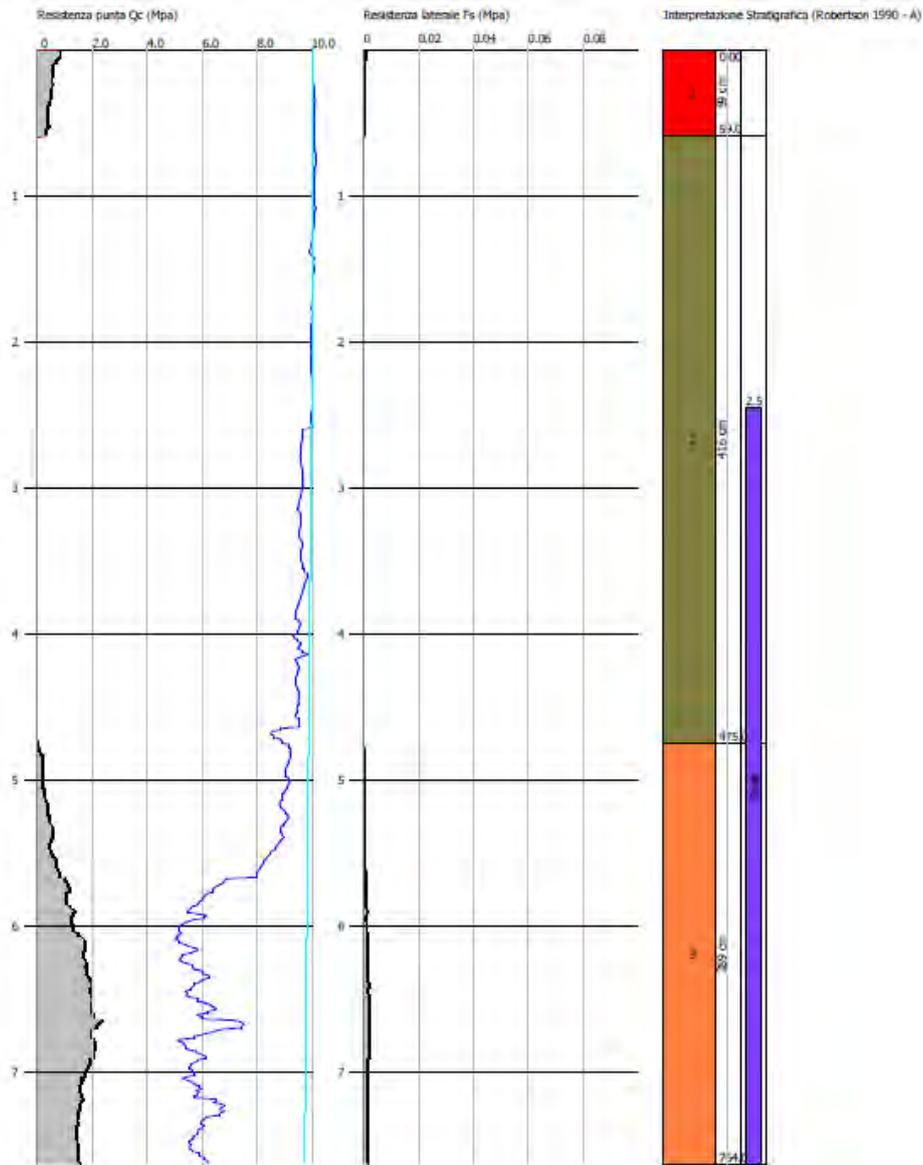
CPTu 7



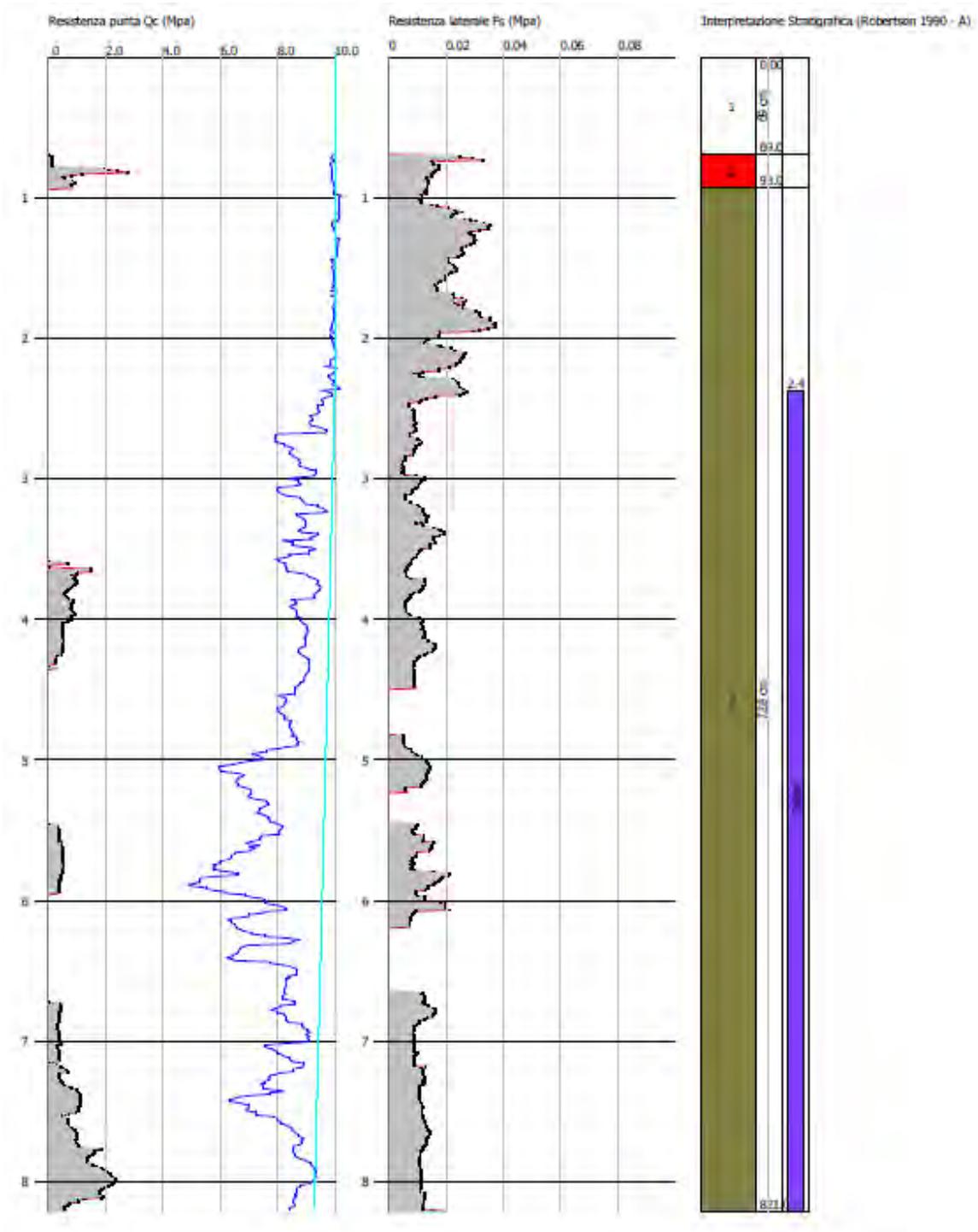
CPTu 8



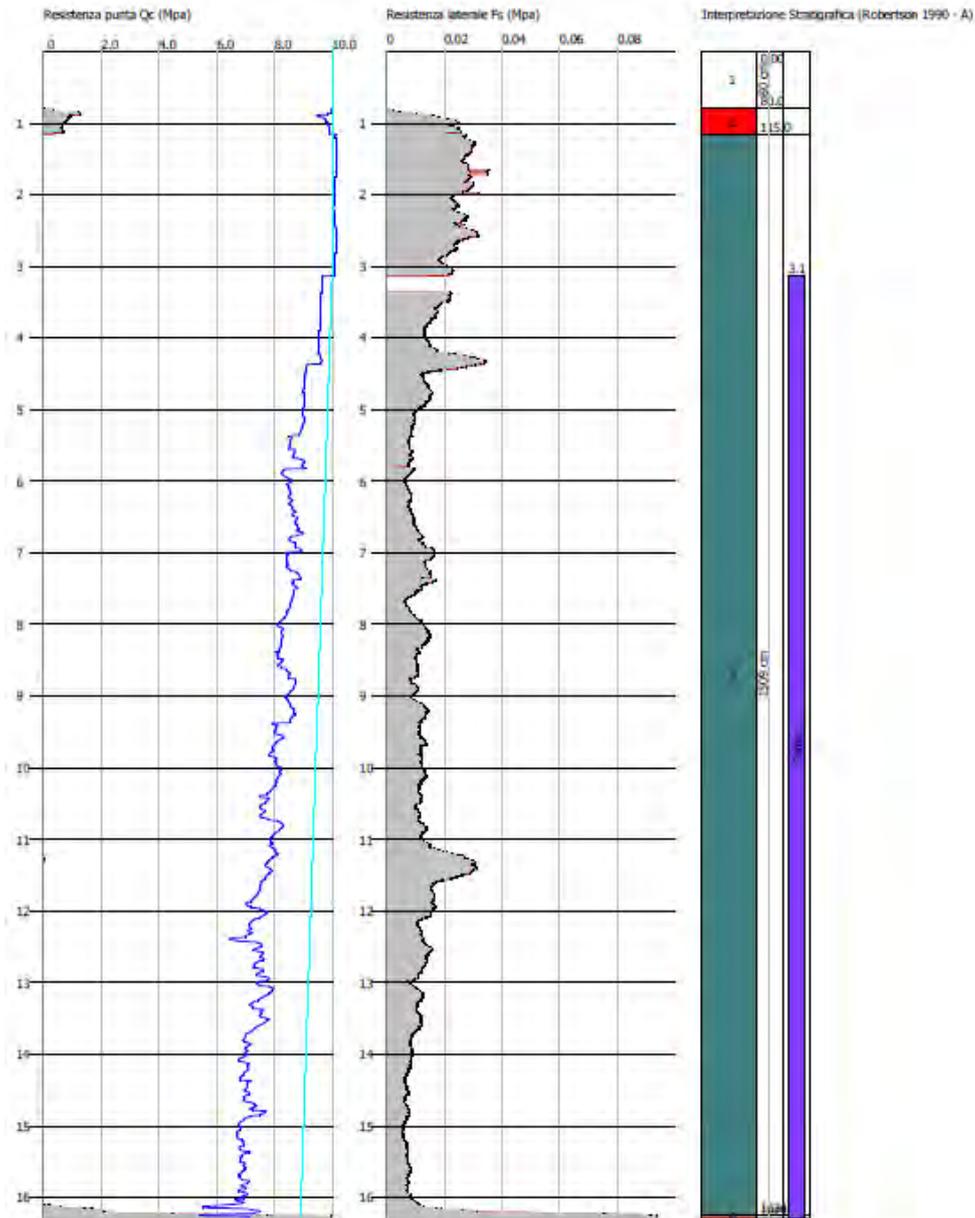
CPTu 9



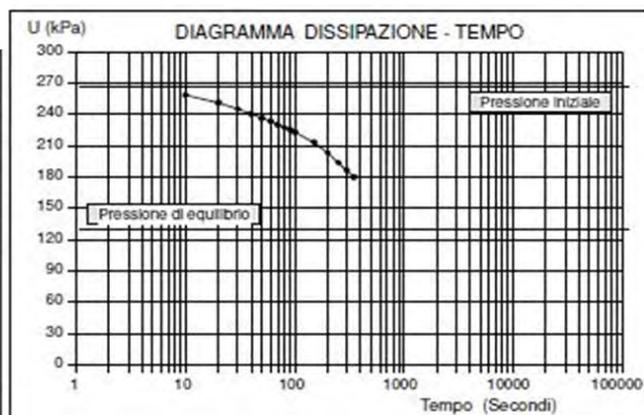
CPTu 10



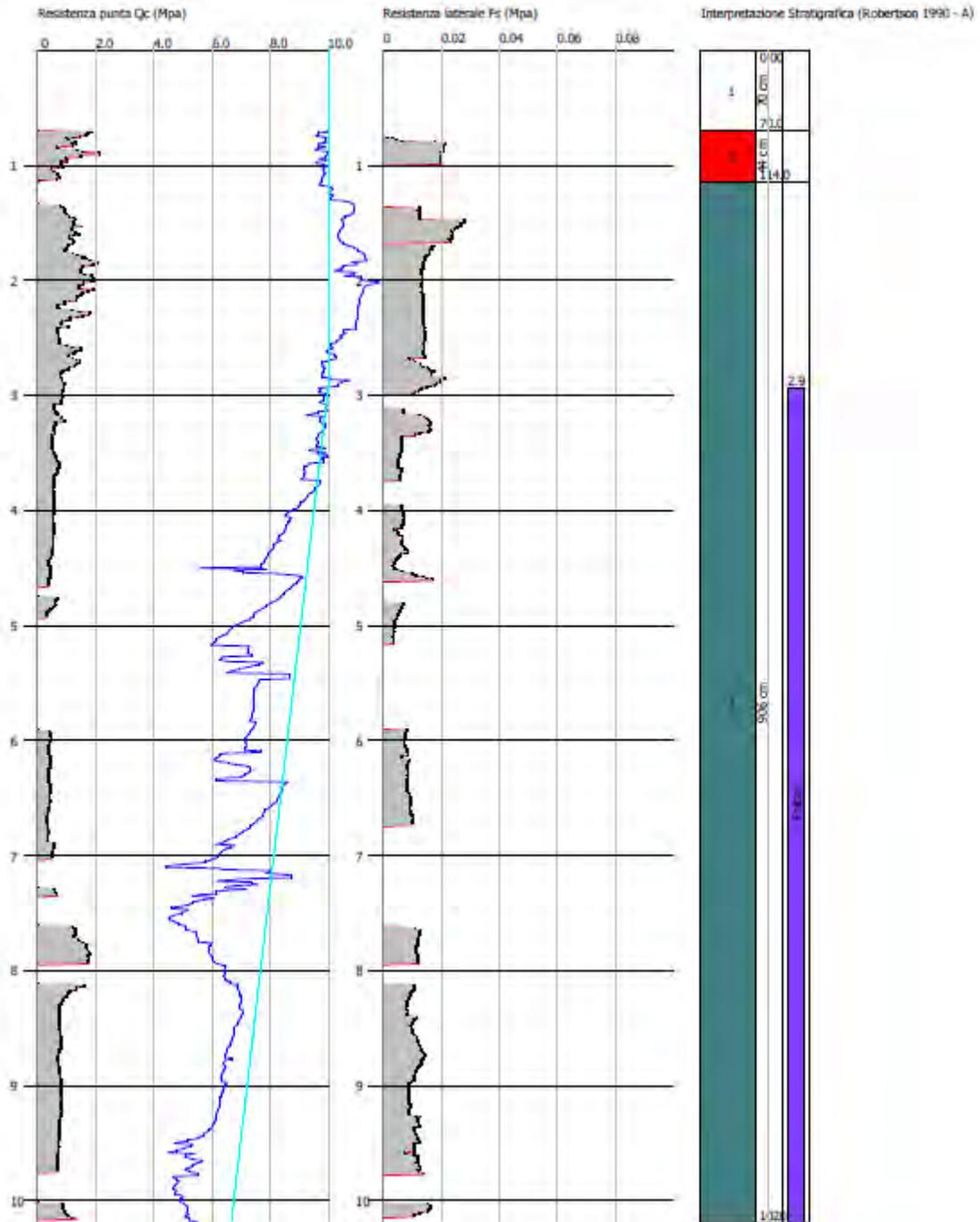
CPTu 11



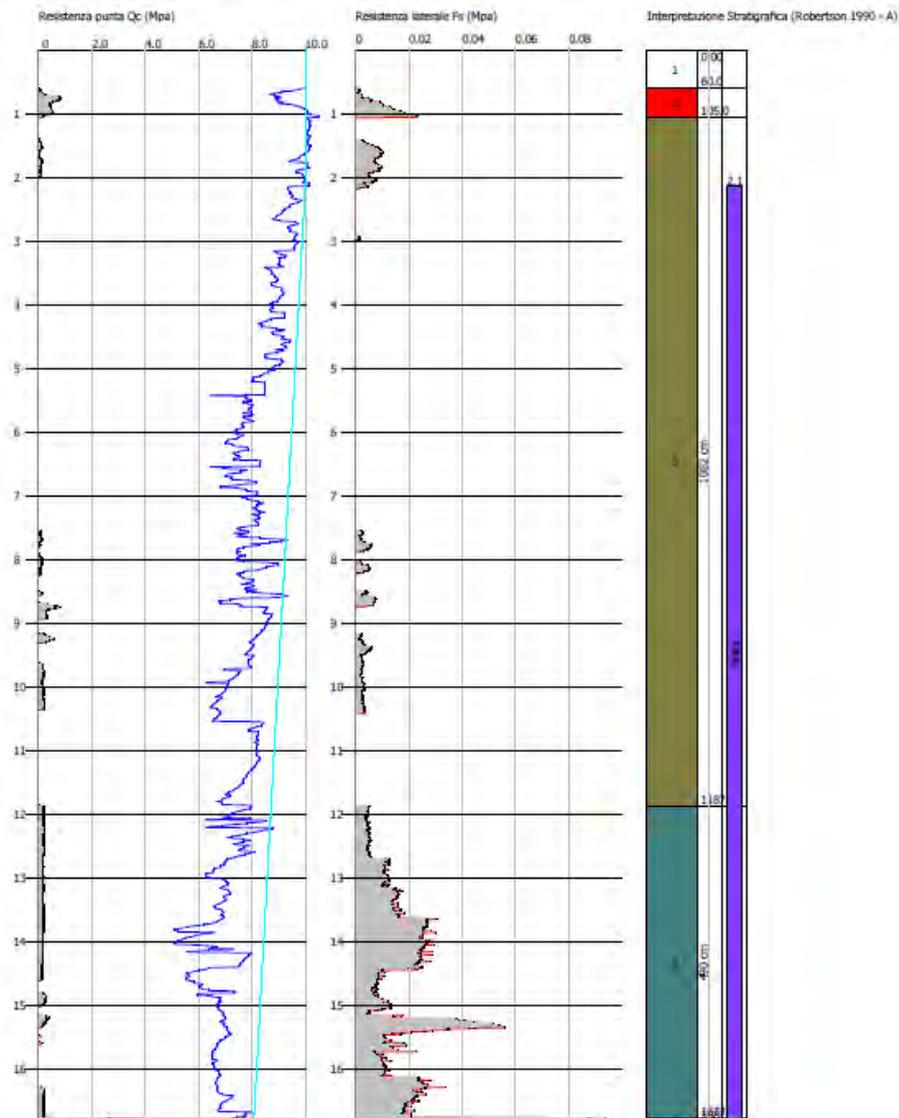
PROVA DI DISSIPAZIONE n° 11	
Profondità di prova (m):	16.29
Profondità della falda (m):	3.10
Pressione di equilibrio (kPa):	129.3
Pressione iniziale (kPa):	267.2
Kh / Kv:	1.00
T ₅₀ (sec):	225
Permeabilità K (cm/sec):	1.15E-06
Note:	
$\bar{U} = (U_t - U_o) / (U_i - U_o)$	



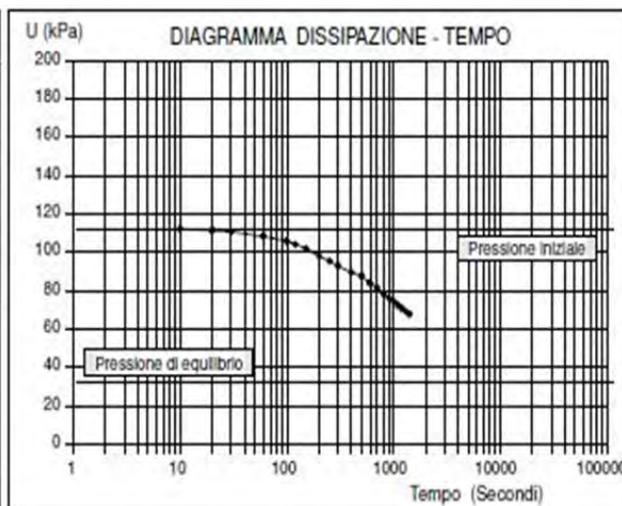
CPTu 12



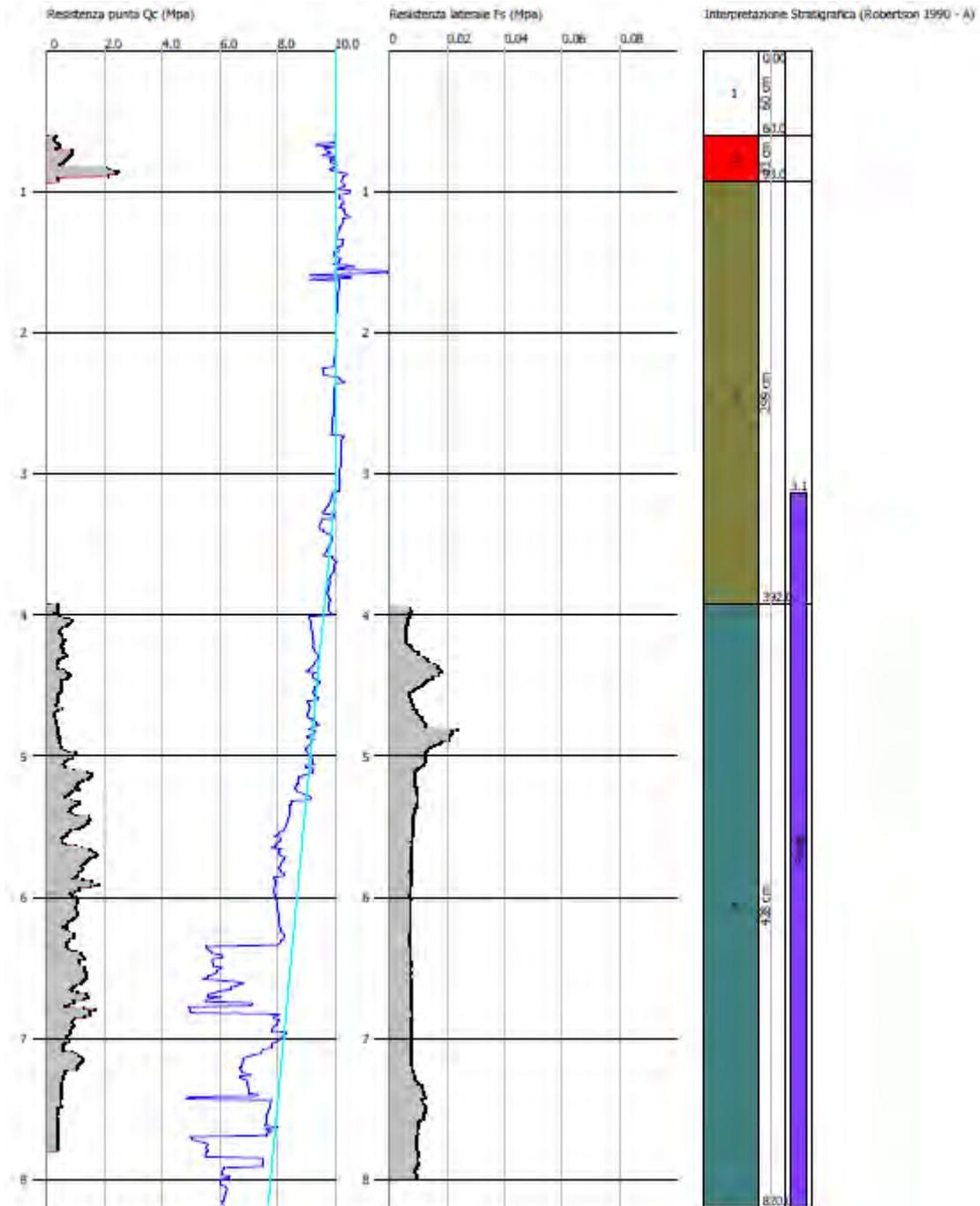
CPTu 13



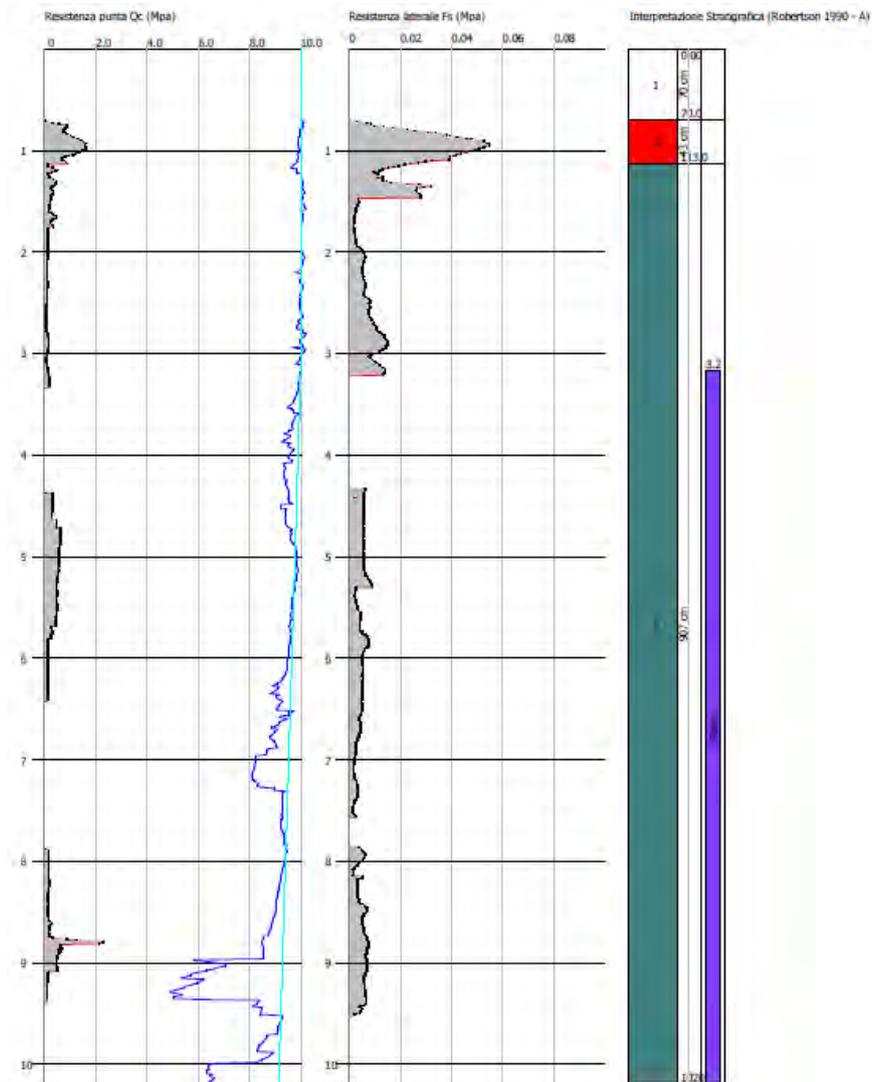
PROVA DI DISSIPAZIONI n° 13	
Profondità di prova (m):	5.40
Profondità della falda (m):	2.10
Pressione di equilibrio (kPa):	32.4
Pressione iniziale (kPa):	112.4
Kh / Kv:	1.00
T ₅₀ (sec):	1104
Permeabilità K (cm/sec):	1.57E-07
Note:	
$\bar{U} = (U_t - U_0) / (U_i - U_0)$	



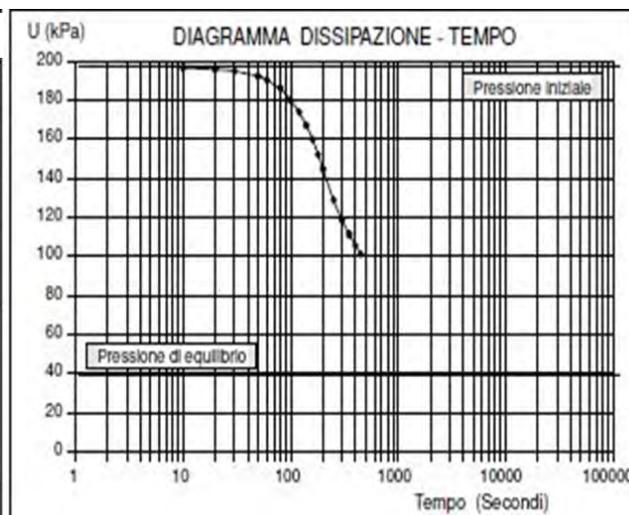
CPTu 14



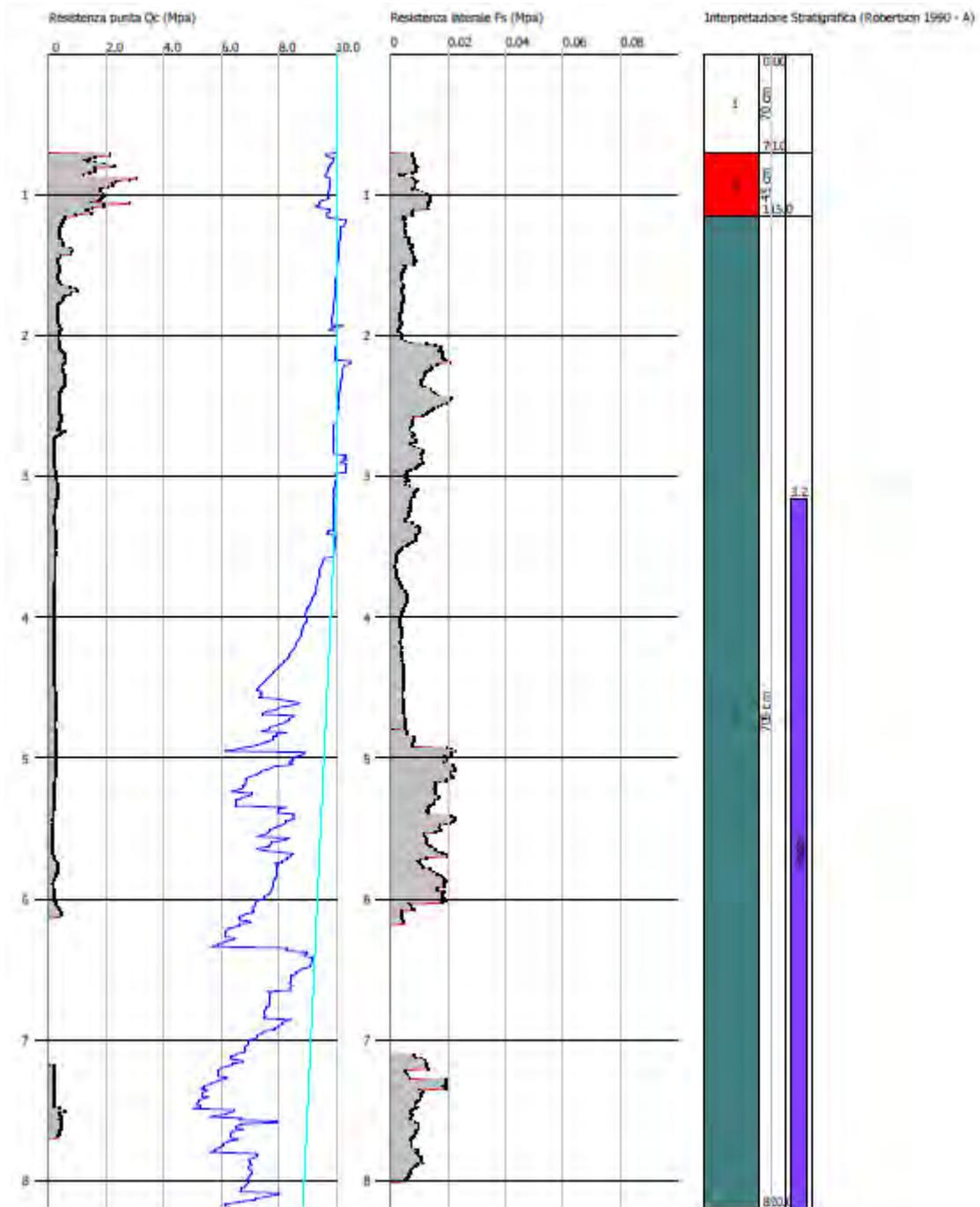
CPTu 15



PROVA DI DISSIPAZIONE n° 15	
Profondità di prova (m):	7.20
Profondità della falda (m):	3.20
Pressione di equilibrio (kPa):	39.2
Pressione iniziale (kPa):	196.9
Kh / Kv:	1.00
T ₅₀ (sec):	302
Permeabilità K (cm/sec):	7.95E-07
Note:	
$\bar{U} = (U_t - U_o) / (U_i - U_o)$	



CPTu 16



L'elaborazione delle CPTU eseguite mostra come nelle zone comprese tra la piana di Mola di Regno e la località "Pantano", i primi metri di profondità dal piano campagna sono generalmente composti da terreni a granulometria fine costituiti essenzialmente da argille e argille limose, alle quali si intercalano con minor frequenza livelli di sabbie limose e limi sabbiosi. La soggiacenza della falda è generalmente compresa tra 2 e 3 metri di profondità.

Mediante l'analisi dei grafici relativi alle prove di dissipazione eseguite per le CPTu1, CPTu2 CPTu3, CPTu4, CPTu6, CPTu8, CPTu9 CPTu11, CPTu13 e CPTu15, è stato possibile stimare il coefficiente di consolidazione ed il coefficiente di permeabilità orizzontale tramite le formule precedentemente citate. Di seguito, in Tabella 7.2.3.1, vengono riportati i risultati derivanti dall'elaborazione effettuata. Si può notare come i coefficienti di permeabilità si attestino su valori bassi o molto bassi in tutte le prove effettuate, a testimonianza di una forte prevalenza di litologie a granulometria fine entro i primi metri da piano campagna.

Nei tratti in cui l'avanzamento della punta è avvenuto per solo peso della colonna di aste, le elaborazioni delle CPTu riportano una resistenza alla punta nulla Q_c e/o laterale F_s nulla perché in tali tratti non sono stati acquisiti valori strumentali. In corrispondenza di tali tratti, si evidenzia che alcune prove hanno restituito dei valori di pressione interstiziale inferiori a quelli idrostatici, con particolare riferimento alle CPTu3 CPTu4 e CPTu5. Tale aspetto è connesso ad un'errata acquisizione delle pressioni interstiziali da parte del piezocono a causa della considerevole velocità di avanzamento per peso proprio della colonna di aste. Questi valori si ritengono quindi affetti da errore strumentale e non vengono presi in considerazione per il modello geologico-idrogeologico di riferimento.

Infine, si sottolinea come le prove CPTu sono state eseguite con il fine di definire più nel dettaglio il livello di falda lungo il tratto di interesse e, soprattutto, avere un'ulteriore indicazione delle permeabilità dei depositi presenti. Per quanto riguarda la caratterizzazione geotecnica degli stessi sono stati presi come riferimento le prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati prelevati nel corso dei sondaggi S1 ed S2.

Si rimanda al paragrafo "6.3. Suscettibilità alla liquefazione" per il calcolo del potenziale di liquefazione dei terreni attraversati, partendo dall'elaborazione dei dati di base (qc, fs, u) registrati durante le CPTu eseguite in campo.

Tabella 7.2.3.1 Tabella riassuntiva della stima del coefficiente di consolidazione e del coefficiente di permeabilità orizzontale stimato a partire dalle prove di dissipazione

N° prova	Raggio del piezocono	Tempo di smaltimento	Coefficiente di consolidazione	Profondità prova da pc	Profondità falda da pc	Coefficiente di permeabilità
	r ² (cm ²)	t ₅₀ (s)	c _h (cm ² /s)	m	m	k _h (m/s)
CPTu1	3.186	123	2.05E-05	6.25	2.3	2.4E-08
CPTu2	3.186	945	1.58E-04	5.80	2.3	1.9E-09
CPTu3	3.186	654	1.09E-04	2.25	1.4	3.0E-09
CPTu4	3.186	213	3.56E-05	4.20	3.04	1.2E-08
CPTu6	3.186	988	1.65E-04	12.0	3.0	1.8E-09
CPTu8	3.186	289	4.83E-05	7.20	3.0	8.4E-09
CPTu9	3.186	1212	2.02E-04	6.20	2.5	1.4E-09
CPTu11	3.186	225	3.76E-05	16.30	3.1	1.1E-08
CPTu13	3.186	1104	1.84E-04	5.40	2.1	1.6E-09
CPTu15	3.186	302	5.04E-05	7.20	3.2	8.0E-09

7.2.4 Prova Pressiometrica (MPM)

La prova è stata eseguita con il pressiometro Menard, appositamente inserito in un foro di sondaggio, come in Figura 7.2.4.1, che si espande e deforma la parete del foro. Per maggiori dettagli sulle caratteristiche della strumentazione e delle modalità esecutive della prova, si rimanda alle descrizioni presenti nei report in allegato.

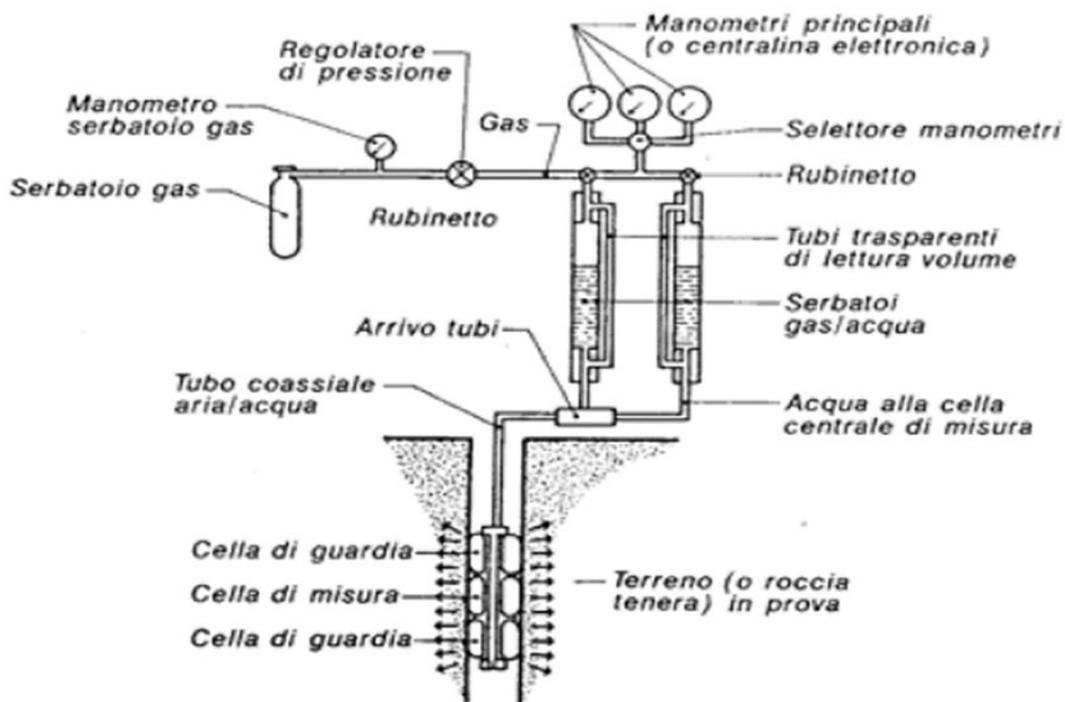


Fig. 7.2.4.1: Schema funzionamento pressiometro Menard

In sintesi, la prova fornisce un grafico che esprime il rapporto pressione-volume totale e pressione-aumento di volume corrispondente. Successivamente, dopo aver individuato il tratto rettilineo della curva nel campo pseudo-elastico, si può stimare il modulo pressiometrico attraverso la formula:

$$E_p = 2(1 + \nu)(V_M) \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

- V_M = volume medio della cella nel tratto pseudo-elastico;
- ΔP = variazione di pressione nel tratto pseudo-elastico;
- ΔV = variazione di volume nel tratto pseudo-elastico;
- ν = modulo di Poisson.

Il volume medio della cella può essere stimato dalla relazione:

$$V_M = V_i \frac{(V_f + V_0)}{2}$$

- V_i = volume iniziale teorico della cella.

Per ricavare il modulo elastico E dal modulo pressiométrico E_p , si divide il valore di quest'ultimo per un coefficiente reologico compreso tra 0.25 ed 1 in relazione al tipo di terreno indagato.

Determinati i parametri E_p , PI ed E si passa alla stima empirica dei parametri di resistenza del terreno in condizioni drenate ϕ e non drenate C_u . Per ricavare il valore della resistenza non drenata si sono utilizzate le seguenti relazioni (*Amar e Jezequel, 1972*):

$$\text{per } PI < 0,3 \text{ MPa: } C_u = PI'/5.5$$

$$\text{per } PI > 0,3 \text{ MPa: } C_u = PI'/10 + 0.025$$

Per la stima dell'angolo di attrito ϕ si è adottata l'interpretazione della curva pressiométrica data del Centro Studi Ménard (1963) che, permette di stimare ϕ con una buona approssimazione.

La relazione empirica da cui sono stati ricavati i valori di ϕ è la seguente:

$$PI' = 0,25 \cdot 2^{(\phi/4 - 6)}$$

Le prove pressiométriche sono state eseguite nei sondaggi S3 bis ed S9. I risultati ottenuti, riportati in Tabella 7.2.4.1, esplicano i parametri direttamente restituiti dalla prova e quelli empiricamente determinati: la pressione limite (PI), la pressione limite netta (PI'), il modulo pressiométrico (E_p), il modulo di Young (E), la coesione non drenata (c_u) e l'angolo di resistenza al taglio (ϕ). Le prove eseguite nel corso della campagna geognostica sono state effettuate in soli cicli di carico, senza quindi effettuare cicli di scarico e ricarico.

Tabella 7.1.3.1 Risultati delle prove Pressiometriche MPM

Codice Sondaggio	Profondità da p.c.	Quota s.l.m	Descrizione litologica	Sigla CARG	Pressione Limite	Pressione Limite netta	Modulo Pressiometrico	Modulo di Young	Coesione non drenata	Angolo di resistenza al taglio
	(m)	(m)			PI (MPa)	PI' (MPa)	Ep (MPa)	E (MPa)	c _u (MPa)	φ (°)
S3 bis	8	314	Sabbie limose	b	2.1	1.9	7.6	23.0		36.0
S3 bis	21	301	Sabbie limose con livelli concrezionati	b	4.1	3.7	21.2	55.8		40.0
S3 bis	31	291	Sabbie limoso argillose	b	6.2	5.7	35.9	79.9	0.6	
S3 bis	44	278	Argille sabbioso limose	b	6.5	5.7	38.9	77.7	0.6	
S3 bis	51	271	Argille e argille marnose	b	6.6	5.9	42.2	84.4	0.6	
S9	23	300	Argille sabbiose	b	4.3	3.9	31.0	91.3	0.4	
S9	27	296	Sabbia argillosa	b	4.9	4.4	24.6	68.4	0.4	
S9	32	291	Argilla con livelli litoidi	b	6.9	6.4	41.2	103.1	0.6	
S9	50	273	Calcere	CDZ	20.0	18.3	112.9	418.2		49.0

L'analisi effettuata ha permesso di distribuire i dati, per ciascuna delle grandezze studiate, in 2 Formazioni (b e CDZ) ed in 3 classi litologiche (calcari, argille, sabbie). Dai dati desunti si può notare come all'aumentare della profondità, si abbia un progressivo aumento del valore di E per la Formazione delle coperture alluvionali (b), i cui depositi più profondi sono soggetti a pressioni di confinamento e stati di consolidazione crescenti (valore comunque nettamente inferiore rispetto a quello misurato in litologie più competenti).

Si evidenzia un trend inverso e una cospicua eterogeneità del modulo di Young per la litologia dei calcari e marne, appartenente alla Formazione geologica CDZ: questo è riconducibile al fatto che questa Formazione è soggetta ad alternanze di bancate calcarenitiche fortemente litoidi che si intervallano a strati marnosi meno competenti, determinando una variabilità dei valori di E talora svincolata dalla profondità di indagine e principalmente determinata dalla componente litologica prevalente.

L'elaborazione condotta sui valori di pressione limite PI, che si ricorda essere il parametro attraverso cui è possibile ottenere una stima dei valori di φ e Cu, mette in

luce un aumento costante del valore di PI con la profondità per tutte le categorie considerate.

7.2.5 Prova di permeabilità Lefranc

La tipologia di prova Lefranc è una prova in foro di tipo puntuale che ha la finalità di determinare il valore del coefficiente di permeabilità caratteristico del terreno indagato, in funzione della velocità di abbassamento o di risalita dell'acqua all'interno del foro di sondaggio, dovuto alla creazione di un sufficiente carico idraulico rispetto al normale livello di falda. La prova Lefranc viene sviluppata in fase di realizzazione del foro di sondaggio e prevede la realizzazione di una tasca isolata, di altezza massima pari a 2 metri, riempita di ghiaia, in corrispondenza del tratto da investigare. La funzione di questa tasca in ghiaia è quella di favorire il flusso d'acqua e, soprattutto, quella di sostenere le pareti del foro, laddove altrimenti tenderebbero a chiudersi. Esistono due tipologie di prova Lefranc: a carico costante e a carico variabile. Durante la campagna geognostica sono state effettuate esclusivamente prove Lefranc a carico variabile.

- Prova a carico variabile in abbassamento: questa tipologia di prova prevede una variazione del livello piezometrico iniziale fino a bocca-pozzo, tramite immissione d'acqua in foro. Al termine di questa operazione, si procede alla misurazione degli abbassamenti del livello piezometrico nel tempo, fino al ripristino della condizione iniziale. Il tempo impiegato per il ripristino del livello piezometrico originario dipende dalle caratteristiche di permeabilità del tratto investigato.
- Prova a carico variabile in risalita: in questa tipologia di prova, dopo aver misurato il livello di falda, è necessario emungere acqua, per mezzo di una elettropompa sommersa, fino a raggiungere un nuovo livello piezometrico prestabilito. Si procede quindi al monitoraggio della risalita del livello dell'acqua, fino al raggiungimento del livello iniziale o in ogni caso per almeno 60 minuti.

In una prova Lefranc a carico variabile, il coefficiente di permeabilità viene calcolato secondo la formula riportata di seguito:

$$k = \frac{A \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)}{C(t_2 - t_1)}$$

dove A corrisponde all'area di base del perforo e C è il coefficiente di forma:

$$C = \frac{4\pi}{\frac{L}{2} \log \frac{L}{2r} \frac{1}{H}}$$

- L = lunghezza della tasca filtrante
- H = interdistanza tra il livello piezometrico iniziale e $\frac{L}{2}$
- 2r = diametro del foro di sondaggio

Il coefficiente di permeabilità, avente le dimensioni di una velocità (m/s), è legato alla resistenza alla filtrazione di un fluido in un mezzo poroso, dipendente dalle proprietà del fluido e dalle caratteristiche del mezzo, come la permeabilità intrinseca, dipendente dalla granulometria e dalla disposizione geometrica dei grani.

Per maggiori dettagli sulle caratteristiche della strumentazione e delle modalità esecutive della prova, si rimanda alle descrizioni presenti nei report in allegato.

Nei sondaggi S2bis, S3 bis, S4, S6, S8, S9, S12 sono state eseguite in totale 21 prove di permeabilità Lefranc a carico variabile. Nella Tabella 7.2.9.1 sono indicate le profondità indagate ed il valore del coefficiente di permeabilità "k" in m/s.

Tabella 7.1.8.1 Risultati delle prove Lefranc

Codice Sondaggio	Profondità da p.c.	Quota s.l.m	Descrizione litologica	Sigla CARG	Coefficiente di permeabilità
	m	m			k (m/s)
S3 bis	5 - 7.5	318 - 314.5	Sabbie limose	b	7.7E-06
S3 bis	12 - 15.3	310 - 306.7	Sabbie limose	b	9.1E-06
S3 bis	18.3 - 20.5	303.7 - 301.5	Sabbie limose	b	1.1E-05
S4	10 - 10.5	314 - 313.5	Breccia calcarea in matrice sabbiosa grossolana debolmente argillosa	b	
S4	15 - 15.5	309 - 308.5	Sabbia argillosa da poco consistente a sciolta ed inclusi calcarei	b	7.0E-07
S4	25 - 25.5	299 - 298.5	Arenaria da fratturata a mediamente compatta	UAP	4.8E-07
S6	15 - 15.5	305 - 304.5	Breccia calcarea con ciottoli, molto addensata	b	1.0E-03
S6	20 - 20.5	300 - 299.5	Alternanza di calcare fratturato e breccia calcarea	CBZ 3	1.4E-03
S6	25 - 25.5	295 - 294.5	Alternanza di calcare fratturato e breccia calcarea	CBZ 3	1.1E-03
S8	15 - 15.5	303 - 302.5	Sabbia calcarea sciolta, pulita e ben classata. Probabilmente travertinosa	b	1.4E-03
S8	20 - 20.5	298 - 297.5	Sabbia calcarea sciolta, pulita e ben classata. Probabilmente travertinosa	b	1.1E-03
S8	25 - 25.6	293 - 292.4	Sabbia calcarea sciolta, pulita e ben classata. Probabilmente travertinosa	b	1.2E-03
S9	5.3 - 7	317.7 - 316	Ghiaie e sabbie grossolane con livello di limi calcarei	b	2.5E-05
S9	14.2 - 15.7	308.8 - 307.3	Calcare mediamente fratturato di colore grigio-biancastro	b	5.5E-05
S12	12 - 12.5	308 - 307.5	Limo con sabbia debolmente argilloso e ghiaioso da poco a mediamente consistente	b	5.4E-06
S12	21 - 21.5	299 - 298.5	Ghiaia eterometrica da sub-arrotondata a spigolosa in matrice argilloso-limosa	b	5.2E-05

Le analisi condotte dimostrano un campo di variazione del coefficiente di permeabilità nelle varie Formazioni geologiche fondamentalmente proporzionale alla variabilità litologica intrinseca della formazione stessa. Formazioni altamente eterogenee come i depositi alluvionali della Formazione "b" presente campi di variabilità elevata (da sottolineare come anche gli stessi depositi argillosi, contenendo talora litici e componenti più grossolane, mostrano alti range di variabilità e permeabilità generalmente abbastanza elevate). Formazioni litologicamente più omogenee nei tratti di prova, come i calcari del CBZ3 mostrano invece range di conducibilità idraulica meno

ampi, determinati nel valore assoluto sulla base della presenza della percentuale di materiale fine tra i clasti della matrice rocciosa fratturata. Le restanti Formazioni e litologie coprono invece range di variabilità intermedi.

7.3 Prove di laboratorio geotecnico

Le prove di laboratorio vengono effettuate direttamente su campioni costituiti da terre o rocce accuratamente prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi geognostici.

Con riferimento alle indagini geognostiche eseguite ed alle litologie distinte, sono di seguito riepilogate in modo sintetico le prove di laboratorio eseguite sia su terreni che su roccia. Il totale dei campioni indisturbati, rimaneggiati e spezzoni di roccia analizzati è riportato in Tabella 7.3.1. Per quanto riguarda i risultati completi relativi a tutte le caratteristiche fisiche ed ai parametri geomeccanici ottenuti con le prove di laboratorio svolte, si rimanda agli allegati in calce, in cui sono trattate in modo dettagliato.

Tabella 7.3.1: Quadro sinottico dei campioni prelevati durante la realizzazione dei sondaggi geognostici.

ID Sondaggio	N. campioni indisturbati	N. campioni rimaneggiati e/o spezzoni di roccia
S1	4	0
S2	5	0
S3	4	1
S3 BIS	7	6
S4	2	3
S6	1	2
S7	1	0
S8	2	1
S9	1	8
S12	3	0
S13	2	0
S14	2	7
S14 BIS	0	0

7.3.1 Caratterizzazione dello stato dei materiali in sito

Un elemento di terreno è considerato come un sistema multifase, costituito da uno scheletro solido ed avente dei vuoti riempiti di liquido e/o gas. Per tutti i campioni prelevati durante la campagna geognostica, sia di terra che di roccia, è stata condotta la caratterizzazione dei seguenti parametri di stato:

- peso per unità di volume naturale γ_n ,
- peso per unità di volume saturo γ_{sat} ,
- peso per unità di volume secco γ_d ,
- peso per unità di volume specifico dei granuli γ_s ,
- contenuto naturale d'acqua W ,
- grado di saturazione S_r ,
- indice dei vuoti e ,
- porosità n .

Il valore dei vari limiti di Atterberg è stato invece analizzato per restituire la classificazione USCS degli orizzonti stratigrafici intercettati nei vari sondaggi.

I campioni prelevati nei fori di sondaggio sono successivamente stati sottoposti a prove di laboratorio di diversa tipologia, volte a fornire le caratteristiche meccaniche dei materiali prelevati. Un fattore importante per ottenere risultati affidabili da prove di laboratorio, e congruenti con le reali caratteristiche del materiale in sito, è la qualità del campione (Figura 7.3.1.1).

Caratteristiche geotecniche determinabili	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Natura del terreno	*	*	*	*	*
Composizione granulometrica		*	*	*	*
Contenuto d'acqua naturale			*	*	*
Peso dell'unità di volume				*	*
Caratteristiche meccaniche					*
	Campioni disturbati o rimaneggiati			Disturbo limitato	Indisturbati

Fig. 7.3.1.1: Caratteristiche geotecniche determinabili in funzione della qualità del campione prelevato.

Codice Sondaggio	Codice Campione	Sigla CARG	Top strato da p.c.	Bottom strato da p.c.	Contenuto naturale d'acqua	Peso di volume Naturale	Peso di volume Secco	Peso di volume Saturo	Peso specifico granuli	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	% Argilla	Attività Argilla	Limite liquido	Limite plastico	Indice plasticità	Indice consistenza
			<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Wn</i>	<i>Yn</i>	<i>Yd</i>	<i>Ysat</i>	<i>Ys</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>Sr</i>	<i>%</i>	<i>A</i>	<i>LL</i>	<i>LP</i>	<i>IP</i>	<i>IC</i>
S1	C1	b	3.5	4.0	28.5	18.4	14.3	18.9	26.8	0.87	46.6	89.6	35.8	0.9	69.0	35.3	33.7	1.20
S1	C2	b	6.5	7.0	30.8	18.7	14.3	18.8	26.7	0.87	46.6	96.2	34.1	0.9	65.3	36.3	29.0	1.19
S1	C4	b	12.5	13.0	27.1	18.9	14.9	19.1	26.0	0.75	42.7	96.5	25.1	1.2	58.9	29.5	29.4	1.08
S2	C1	b	2.0	2.5	30.1	17.9	13.8	18.6	27.0	0.97	49.1	86.0	35.2	1.0	69.5	35.1	34.4	1.14
S2	C2	b	6.5	7.0	26.4	18.7	14.8	19.3	27.2	0.84	45.6	87.1	36.1	0.9	63.7	30.2	33.5	1.11
S2	C3	b	10.0	10.5	26.3	18.7	14.8	18.8	25.0	0.69	40.9	97.1	47.1	0.5	56.1	33.7	22.4	1.33
S2	C5	b	17.0	17.5	17.0	19.4	16.6	20.1	25.7	0.55	35.4	81.3	19.1	0.6	37.1	24.7	12.4	1.62
S3	C1	b	6.0	6.5	24.9	19.3	15.5	19.5	26.6	0.69	40.6	96.5	38.1	0.4	37.9	23.8	14.1	0.92
S3	C2	b	9.0	9.5	24.0	19.4	15.7	19.5	26.4	0.65	39.5	96.9	34	0.5	39.7	22.0	17.7	0.89
S3	C3	b	15.0	15.5	27.2	18.6	14.7	18.9	26.3	0.76	43.3	94.0	66.2	0.3	57.5	36.0	21.5	1.41
S3	C4	b	18.8	19.0	29.0	18.6	14.4	18.8	26.6	0.81	44.7	95.3	54.5	0.5	50.8	25.7	25.1	0.87
S3	C5	b	26.7	27.0	27.1	18.5	14.6	18.8	26.3	0.77	43.6	92.5	53.6	0.6	56.2	26.5	29.7	0.98

RELAZIONE GEOLOGICA

S3 bis	C1	b	6.5	7.0	27.0	19.4	15.2	19.5	26.7	0.75	42.9	97.6	42.5	0.8	59.5	25.2	34.3	0.95
S3 bis	C2	b	11.0	11.5	36.6	17.3	12.6	17.7	26.1	1.07	51.6	91.6	53.2	0.6	63.2	30.5	32.7	0.81
S3 bis	C3	b	14.0	14.5	36.5	17.4	12.7	17.8	26.1	1.05	51.2	92.6	69.8	0.4	62.4	31.3	31.1	0.83
S3 bis	C4	b	16.5	17.0	33.1	17.3	13.0	18.1	27.4	1.11	52.7	83.2	69.4	0.4	60.5	31.3	29.2	0.94
S3 bis	C5	b	19.0	19.5	28.7	18.5	14.4	19.0	27.1	0.89	47.0	89.6	45.7	0.7	57.6	23.7	33.9	0.85
S3 bis	C6	b	23.0	23.5	28.4	19.5	15.2	19.5	27.0	0.77	43.6	100.0	22.8	0.6	37.9	24.1	13.8	0.69
S3 bis	C7	b	29.0	29.5	21.1	20.3	16.7	20.3	26.5	0.59	37.0	97.3	20	1.7	67.7	33.4	34.3	1.36
S3 bis	c1	b	33.3	33.5	14.4	18.4	16.1	20.1	27.3	0.70	41.0	57.7	29.7	0.5	39.6	26.1	13.5	1.87
S3 bis	c2	b	38.4	38.6	7.1	15.5	14.4	19.0	27.0	0.87	46.6	22.5	27.6	0.7	43.7	25.3	18.4	1.99
S3 bis	c3	b	43.5	43.8	8.5	18.1	16.7	20.4	26.8	0.61	37.8	38.4	10.2	1.0	38.2	28.3	9.9	3.00
S3 bis	c5	b	52.2	52.5	9.1	17.1	15.7	19.8	27.0	0.72	41.8	34.9	8.2	2.8	52.6	29.6	23.0	1.89
S3 bis	c6	b	58.6	58.9	12.3	17.0	15.1	19.4	27.0	0.79	44.0	43.0	17.6	1.0	46.7	28.3	18.4	1.87
S4	C1	b	7.5	8.0	9.3	19.1	17.4	20.5	26.0	0.47	31.8	52.2	5.8	0.0				
S4	C2	b	18.0	18.5	23.9	18.2	14.7	18.9	26.2	0.75	42.8	83.6	38.7	0.4	57.0	43.2	13.8	2.40

RELAZIONE GEOLOGICA

S6	C1	b	5.5	6.0	35.8	17.0	12.5	17.6	26.8	1.11	52.5	86.7	52	0.4	57.7	34.4	23.3	0.94
S8	C1	b	3.0	3.5	32.4	17.4	13.2	18.0	26.6	0.98	49.5	87.9	40.5	0.3	58.4	44.5	13.9	1.87
S8	C2	b	7.0	7.5	21.2	19.2	15.8	19.5	26.0	0.61	38.1	89.8	26.5	0.7	53.7	35.8	17.9	1.82
S9	C1	b	10.5	11.0	36.7	15.5	11.3	17.0	26.8	1.36	57.6	73.8	13.8	0.6	46.5	37.7	8.8	1.11
S9	c1	b	12.0	13.0	6.6	17.2	16.1	20.0	26.7	0.66	39.7	27.3	25.2	0.6	43.1	28.5	14.6	2.50
S9	c2	b	21.0	22.0	6.4	16.4	15.4	19.5	26.2	0.70	41.1	24.6	10.9	0.8	35.7	27.4	8.3	3.53
S9	c3	b	29.0	29.5	3.0	15.7	15.3	19.5	26.9	0.76	43.3	10.9	19.6	0.5	35.7	26.6	9.1	3.59
S9	c4	b	30.5	31.0	5.6	17.3	16.4	20.3	27.1	0.65	39.5	23.9	19.1	0.6	36.6	25.7	10.9	2.84
S9	c5	b	42.5	43.0	5.2	16.7	15.9	19.7	26.1	0.65	39.2	21.6	22.3	0.7	40.5	25.3	15.2	2.32
S9	c6	CDZ	48.6	48.9	1.9	24.5			27.3		12.0							
S9	c7	CDZ	51.8	52.4	1.5	25.1			27.3		9.0							
S12	C1	b	3.0	3.5	31.4	18.5	14.0	18.6	26.5	0.85	46.0	97.7	57.9	0.4	60.1	39.4	20.7	1.39
S12	C2	b	6.0	6.5	44.2	15.3	10.6	16.3	26.0	1.40	58.4	82.0	3					
S12	C3	b	9.0	9.5	65.0	15.3	9.3	15.6	26.8	1.84	64.8	94.9	7.7	2.4	66.7	48.4	18.3	0.09

RELAZIONE GEOLOGICA

S13	C1	b	4.0	4.5	27.8	18.7	14.6	19.0	26.8	0.80	44.3	93.4	42.8	0.5	54.7	34.9	19.8	1.36
S13	C2	b	8.0	8.6	31.5	17.5	13.3	18.0	26.2	0.94	48.4	88.3	24.7	0.7	37.4	18.9	18.5	0.32
S14	C1	b	2.5	3.0	23.7	19.4	15.7	19.5	25.4	0.62	38.2	99.4	30.7	0.7	48.0	26.2	21.8	1.12
S14	C2	b	7.5	8.0	20.4	19.1	15.9	19.5	25.4	0.60	37.6	87.8	35.6	0.7	45.8	21.4	24.4	1.04
S14	C3	b	13.0	13.5	4.2				26.5				2.4	0.0				
S14	C4	b	18.0	18.5	1.8				26.8									
S14	C5	b	21.5	22.0	5.8				26.0				2.5	0.0				
S14	C6	b	25.5	26.0	23.2				26.2				3	1.6	30.1	25.4	4.7	1.48
S14	C7	SCZ 2	37.0	37.5	1.2	23.3					16.1							
S14	C8	SCZ 2	44.5	45.0	1.6	23.9					13.6							
S14	C9	SCZ 2	49.5	50.0	1.5	24.1					14.0							

7.3.2 Prova edometrica

Questa tipologia di prova riproduce in laboratorio le condizioni di consolidazione monodimensionale al fine di determinare le caratteristiche di compressibilità dei materiali fini saturi. La prova consiste nell'applicare carichi, incrementandoli progressivamente, ad un provino confinato lateralmente in modo che le deformazioni e il flusso dell'acqua avvengano solo nella direzione verticale; viene determinato, quindi, il cedimento del provino per ciascun carico applicato.

Le prove sono state condotte secondo le Norme UNI CEN ISO/TS 17892-5 e ASTM D2435/80.

Le modalità standard di esecuzione della prova, secondo le *Raccomandazioni AGI 1994*, prevedono l'applicazione del carico verticale N ad intervalli crescenti, ciascuno dei quali viene mantenuto il tempo necessario (solitamente 24 ore) per consentire il cedimento di consolidazione.

Codice Sondaggio	Codice Campione	Sigla CARG	Descrizione litologica	Top strato da p.c.	Bottom strato da p.c.	P. vert. efficace (alla quota di prelievo)	P. di pre-consolidazione	Modulo edometrico (alla pressione di sito)
				m	m	σ_v'	σ_v (kPa)	M (kPa)
S1	C1	b	Limo con argilla debolmente sabbioso di colore marrone	3.5	4	29.4	245	10.3
S1	C2	b	Limo con argilla debolmente sabbioso di colore marrone	6.5	7	56.55	167	8.1
S1	C4	b	Limo con argilla sabbioso debolmente ghiaioso di colore marrone	12.5	13	111.25	86.3	4.2
S2	C1	b	Limo con argilla sabbioso di colore marrone	2	2.5	15.8	104.8	1.0
S2	C2	b	Limo con argilla sabbioso di colore marrone olivastro chiaro	6.5	7	56.55	81	3.1
S2	C3	b	Limo con argilla debolmente sabbioso di	10	10.5	87	133	7.1

RELAZIONE GEOLOGICA

			colore marrone-giallastro chiaro					
S2	C5	b	Sabbia argillosa e limosa e ghiaiosa di colore marrone scuro	17	17.5	159.8	154.2	7.5
S3	C1	b	Argilla con limo e sabbia di colore grigiastro	6	6.5	84.28	65	2.8
S3	C2	b	Limo con argilla sabbioso debolmente ghiaioso di colore marrone	9	9.5	112.84	110	4.5
S3	C3	b	Argilla con limo debolmente sabbiosa di colore marrone scuro-nerastro	15	15.5	166.96	320	7.3
S3	C5	b	Argilla con limo debolmente sabbiosa di colore marrone chiaro-grigiastro	26.7	27	266.079	135	5.2
S3 bis	C1	b	Argilla limosa e ghiaiosa e sabbiosa	6.5	7	89.1	87	3.4
S3 bis	C2	b	Argilla con limo sabbiosa debolmente ghiaiosa	11	11.5	121.95	57.5	2.8
S3 bis	C3	b	Argilla limosa debolmente sabbiosa	14	14.5	144.15	143.7	3.0
S3 bis	C4	b	Argilla limosa debolmente sabbiosa	16.5	17	162.4	208.5	8.8
S3 bis	C5	b	Limo con argilla debolmente sabbioso	19	19.5	183.65	164.8	5.3
S3 bis	C6	b	Sabbia con limo argillosa	23	23.5	221.65	210.9	15.2
S3 bis	C7	b	Limo con sabbia argilloso	29	29.5	283.45	195.5	11.7
S4	C2	b	Argilla con limo e sabbia di colore marrone scuro-nerastro con rari resti lignei	18	18.5	212.85	300	7.7
S6	C1	b	Argilla con limo debolmente	5.5	6	93.5	300	8.6

			sabbiosa di colore marrone					
S8	C1	b	Argilla con limo ghiaiosa e sabbiosa di colore marrone	3	3.5	53.16	190	2.9
S8	C2	b	Sabbia con argilla limosa e ghiaiosa di colore marrone chiaro	7	7.5	107.5	80	3.8
S12	C1	b	Argilla limosa e sabbiosa debolmente ghiaiosa di colore marrone	3	3.5	55.53	350	6.0
S12	C3	b	Limo con sabbia debolmente argilloso e ghiaioso.	9	9.5	147.42	130	2.7
S13	C1	b	Argilla con limo sabbiosa con inclusi calcarei	4	4.5	74.8	600	5.4
S13	C2	b	Sabbia travertinosa argillosa, ghiaiosa e limosa	8	8.6	143.16	250	4.9
S14	C1	b	Limo con argilla sabbioso di colore marrone scuro	2.5	3	48.5	137.3	4.2
S14	C2	b	Limo con argilla sabbioso di colore marrone	7.5	8	143.8	73.4	3.3

7.3.3 Prova ad espansione laterale libera (ELL)

La Prova ad Espansione laterale libera ELL (concettualmente identica alla precedente prova di compressione uniassiale), consiste nel collocare un provino di terreno di forma cilindrica nella direzione assiale in una pressa e portarlo a rottura per compressione verticale lasciandolo libero di espandersi lateralmente ($\sigma_3=0$). La prova ELL si esegue su terreni principalmente coesivi, permettendo di determinare la pressione a rottura verticale e la coesione non drenata c_u (a partire dalla costruzione del cerchio di Mohr si assume che la c_u sia la metà del carico a rottura).

Le prove sono state eseguite secondo la Norma UNI CEN ISO/TS 17892-7 e ASTM D 2166/85.

RELAZIONE GEOLOGICA

Codice Sondaggio	Codice Campione	Descrizione litologica	Sigla CARG	Top strato da p.c.	Bottom strato da p.c.	Compressione a rottura	Coesione non drenata
				m	m	σ (kPa)	c_u (kPa)
S1	C1	Limo con argilla debolmente sabbioso di colore marrone	b	3.5	4	273	136.5
S1	C2	Limo con argilla debolmente sabbioso di colore marrone	b	6.5	7	250	125
S1	C4	Limo con argilla sabbioso debolmente ghiaioso di colore marrone	b	12.5	13	212	106
S2	C1	Limo con argilla sabbioso di colore marrone	b	2	2.5	233	116.5
S2	C2	Limo con argilla sabbioso di colore marrone olivastro chiaro	b	6.5	7	143	71.5
S2	C3	Limo con argilla debolmente sabbioso di colore marrone-giallastro chiaro	b	10	10.5	160	80
S2	C5	Sabbia argillosa e limosa e ghiaiosa di colore marrone scuro	b	17	17.5	94.8	47.4
S3	C1	Argilla con limo e sabbia di colore grigiastro	b	6	6.5	86	43
S3	C2	Limo con argilla sabbioso debolmente ghiaioso di colore marrone	b	9	9.5	75	37
S3	C3	Argilla con limo debolmente sabbiosa di colore marrone scuro-nerastro	b	15	15.5	141	70

RELAZIONE GEOLOGICA

S3	C4	Argilla con limo sabbioso di colore marrone scuro-nerastro	b	18.8	19		
S3	C5	Argilla con limo debolmente sabbiosa di colore marrone chiaro-grigiastro	b	26.7	27	69	34
S3 bis	C1	Argilla limosa e ghiaiosa e sabbiosa	b	6.5	7	75.2	38
S3 bis	C2	Argilla con limo sabbiosa debolmente ghiaiosa	b	11	11.5	74.5	37
S3 bis	C3	Argilla limosa debolmente sabbiosa	b	14	14.5	60.3	30
S3 bis	C4	Argilla limosa debolmente sabbiosa	b	16.5	17	186	93
S3 bis	C5	Limo con argilla debolmente sabbioso	b	19	19.5	80	40
S3 bis	C6	Sabbia con limo argillosa	b	23	23.5	64.5	32
S3 bis	C7	Limo con sabbia argilloso	b	29	29.5	50.3	25
S4	C2	Argilla con limo e sabbia di colore marrone scuro-nerastro con rari resti lignei	b	18	18.5	112	56
S6	C1	Argilla con limo debolmente sabbiosa di colore marrone	b	5.5	6	146	73
S8	C1	Argilla con limo ghiaiosa e sabbiosa di colore marrone	b	3	3.5	105	52
S8	C2	Sabbia con argilla limosa e ghiaiosa di colore marrone chiaro	b	7	7.5	85	43

S9	C1	Sabbia con ghiaia limosa e argillosa	b	10.5	11	61	30
S12	C1	Argilla limosa e sabbiosa debolmente ghiaiosa di colore marrone	b	3	3.5	132	66
S12	C3	Limo con sabbia debolmente argilloso e ghiaioso	b	9	9.5	54	27
S13	C1	Argilla con limo sabbiosa con inclusi calcarei	b	4	4.5	308	154
S13	C2	Sabbia travertinosa argillosa, ghiaiosa e limosa	b	8	8.6	110	55
S14	C1	Limo con argilla sabbioso di colore marrone scuro	b	2.5	3	50	25
S14	C2	Limo con argilla sabbioso di colore marrone	b	7.5	8	63	31

7.2.4 Prova di taglio diretto (TD)

La prova, effettuata mediante l'utilizzo della scatola di Casagrande, consiste nel portare a rottura lungo un piano di scorrimento caratterizzato da pressione normale costante e ad una tensione tangenziale crescente, tre provini di terreno sottoposti a diversi carichi verticali. Lo sforzo di taglio a rottura τ e la tensione normale σ_n sono legati tra loro dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb, così espresso:

$$\tau = c' + \sigma' \tan\varphi'$$

- τ = resistenza al taglio del terreno lungo un piano
- σ' = tensione efficace normale applicata sul piano
- c' = coesione efficace
- φ' = angolo di attrito interno efficace

Le coppie σ_n - τ a rottura ricavate dalle tre prove, possono essere unite mediante una retta che rappresenta la linea di involucro a rottura dalla quale è possibile ricavare i valori di coesione (c') ed angolo di attrito (ϕ').

La prova, come riferito dalle ditte esecutrici, è stata condotta in maniera Consolidata – Drenata (CD): questo implica che il provino saturo viene lasciato consolidare fino alla completa dissipazione delle pressioni neutre, e che la velocità di taglio sia sufficientemente lenta da consentire la dissipazione delle sovrappressioni dell'acqua indotte.

Le prove sono state condotte secondo le Norme ASTM D 3080 e UNI CEN ISO/TS 17892-10.

Codice Sondaggio	Codice Campione	Descrizione litologica	Sigla CARG	Top strato da p.c.	Bottom strato da p.c.	Angolo di attrito	Coesione drenata
				m	m	ϕ' (°)	c' (kPa)
S1	C1	Limo con argilla debolmente sabbioso di colore marrone	b	3.5	4	25.8	30.8
S1	C2	Limo con argilla debolmente sabbioso di colore marrone	b	6.5	7	26.2	25.9
S1	C4	Limo con argilla sabbioso debolmente ghiaioso di colore marrone	b	12.5	13	26.2	20.9
S2	C1	Limo con argilla sabbioso di colore marrone	b	2	2.5	23.4	17.2
S2	C2	Limo con argilla sabbioso di colore marrone olivastro chiaro	b	6.5	7	23.1	10.2
S2	C3	Limo con argilla debolmente sabbioso di colore marrone-giallastro chiaro	b	10	10.5	21.7	12.6
S2	C5	Sabbia argillosa e limosa e ghiaiosa di colore marrone scuro	b	17	17.5	30.5	8.6
S3	C1	Argilla con limo e sabbia di colore grigiastro	b	6	6.5	26.6	5.9
S3	C2	Limo con argilla sabbioso debolmente ghiaioso di colore marrone	b	9	9.5	25.6	3.9
S3	C3	Argilla con limo debolmente sabbiosa di colore marrone scuro-nerastro	b	15	15.5	26.8	16.5

RELAZIONE GEOLOGICA

S3	C5	Argilla con limo debolmente sabbiosa di colore marrone chiaro-grigiastro	b	26.7	27	26.2	7.7
S3 bis	C1	Argilla limosa e ghiaiosa e sabbiosa	b	6.5	7	27.4	14.8
S3 bis	C2	Argilla con limo sabbiosa debolmente ghiaiosa	b	11	11.5	23.1	5.0
S3 bis	C3	Argilla limosa debolmente sabbiosa	b	14	14.5	24.8	10.1
S3 bis	C4	Argilla limosa debolmente sabbiosa	b	16.5	17	23.5	24.7
S3 bis	C5	Limo con argilla debolmente sabbioso	b	19	19.5	21.3	9.5
S3 bis	C6	Sabbia con limo argillosa	b	23	23.5	26.8	8.9
S3 bis	C7	Limo con sabbia argilloso	b	29	29.5	27.2	8.3
S4	C2	Argilla con limo e sabbia di colore marrone scuro-nerastro con rari resti lignei	b	18	18.5	26.6	16.2
S6	C1	Argilla con limo debolmente sabbiosa di colore marrone	b	5.5	6	26.5	13.4
S8	C1	Argilla con limo ghiaiosa e sabbiosa di colore marrone	b	3	3.5	26.6	7.4
S8	C2	Sabbia con argilla limosa e ghiaiosa di colore marrone chiaro	b	7	7.5	28.7	5.3
S9	C1	Sabbia con ghiaia limosa e argillosa	b	10.5	11	33.0	11.0
S12	C1	Argilla limosa e sabbiosa debolmente ghiaiosa di colore marrone	b	3	3.5	27.3	13.1
S12	C2	Sabbia travertinoso con ghiaia limosa	b	6	6.5	30.6	1.7
S12	C3	Limo con sabbia debolmente argilloso e ghiaioso	b	9	9.5	26.2	3.4
S13	C1	Argilla con limo sabbiosa con inclusi calcarei	b	4	4.5	27.6	19.0

S13	C2	Sabbia travertinoso argillosa, ghiaiosa e limosa	b	8	8.6	29.0	5.3
S14	C1	Limo con argilla sabbioso di colore marrone scuro	b	2.5	3	23.8	9.1
S14	C2	Limo con argilla sabbioso di colore marrone	b	7.5	8	24.2	10.1

7.3.4 Colonna risonante (RC)

La prova di colonna risonante si utilizza per misurare i parametri dinamici dei terreni determinando le leggi di decadimento della rigidità G e dell'incremento del fattore di smorzamento D in funzione della deformazione tangenziale in condizioni di frequenza di risonanza.

La prova RC è stata condotta secondo la normativa ASTM D4015-92.

Vengono di seguito riportati la codifica dei campioni analizzati mediante prova RC e la pagina dell'ALLEGATO1 dove trovare i risultati: S3C1(p. 73), S3C2(p. 297), S3C3(p. 321), S3C4 (p.345), S3C5 (p. 369), S3C6 (p.393), S3C7 (P. 417).

7.3.5 Prova di compressione uniassiale

La prova consiste nel collocare il campione di roccia cilindrico tra delle piastre a cui si imprime un carico assiale aumentandolo gradualmente sino a rottura.

Le prove sono state condotte secondo le Norme UNI - EN 1926, ISRM 1994 - 1979 ed ASTM D7012-14.

In laboratorio è possibile, quindi, determinare il valore della resistenza a compressione semplice σ_c tramite la formula:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

- σ = resistenza alla compressione uniassiale
- P = carico a rottura
- A = area iniziale della sezione trasversale

Codice Sondaggio	Codice Campione	Unità Litotecnica	Descrizione litologica	Sigla CARG	Tipo	Top strato	Bottom strato	Compressione
						da p.c. m	da p.c. m	uniassiale σ (MPa)
S4	C3	Depositi Silicoclastici Sin-orogenici	Arenaria litoide di colore grigio	UAP	semi dist	27.6	28	49.1
S4	C4	Depositi Silicoclastici Sin-orogenici	Arenaria litoide di colore giallastro	UAP	semi dist	33	33.5	38.0
S4	C5	Depositi Silicoclastici Sin-orogenici	Arenaria litoide di colore grigio	UAP	semi dist	38.5	39	86.2
S6	C2	Formazioni Carbonatiche Fratturate	Calcere travertinoso litoide di colore biancastro-avana	CBZ 3	semi dist	26.2	26.5	25.8
S6	C3	Formazioni Carbonatiche Fratturate	Calcere travertinoso litoide di colore biancastro-avana	CBZ 3	semi dist	33	33.3	59.9
S8	C3	Formazioni con possibile Stratificazione Alternata	Calcere cariato travertinoso	SPT1b	semi dist	23.6	24	32.6
S9	c6	Formazioni con possibile Stratificazione Alternata	Calcere grigio, stato medio di fratturazione	CDZ	rim	48.6	48.9	45.3
S14	C7	Formazioni Carbonatiche Fratturate	Calcarei biancastri sottilmente stratificati e fratturati	SCZ 2	ind	37	37.5	32.8
S14	C8	Formazioni Carbonatiche Fratturate	Calcarei biancastri sottilmente stratificati e fratturati	SCZ 2	ind	44.5	45	40.8
S14	C9	Formazioni Carbonatiche Fratturate	Calcarei biancastri sottilmente stratificati e fratturati	SCZ 2	ind	49.5	50	50.1

7.3.6 Prova triassiale in roccia

La prova è stata condotta su campioni di roccia secondo la Norma ASTM D7012A-B ed in condizioni non drenate (come riportato dalla norma ASTM per i metodi A-B).

I provini sono stati introdotti in una cella di Hoek e circondati da una membrana per isolarli dal liquido in pressione. La cella è stata quindi posizionata tra le piastre di una pressa a compressione ed è stata applicata la pressione di confinamento stabilita, attraverso il circuito idraulico. È stato poi applicato il carico fino alla rottura del provino e sono state registrate le deformazioni degli estensimetri. La prova deve essere eseguita su tre provini, utilizzando le pressioni di confinamento stabilite.

A partire dalle coppie σ_n - τ a rottura ricavate dalle tre prove, è possibile determinare l'inviluppo a rottura caratteristico del materiale. Sulla base di quanto definito dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb è possibile quindi ricavare i valori di coesione non drenata (c_u) ed angolo di attrito (ϕ_u).

Codice Sondaggio	Codice Campione	Unità Litotecnica	Sigla CARG	Top strato da p.c.	Bottom strato da p.c.	Coesione drenata	Angolo di attrito
				m	m	c (MPa)	ϕ (°)
S9	c7	Formazioni con possibile Stratificazione Alternata	CDZ	51.8	52.4	1.7	41

7.4 Indagini geofisiche

I metodi geofisici sono classificati come tecniche di tipo attivo o passivo: quelle attive forniscono energia o azione del terreno misurandone le risposte, mentre quelle passive registrano la forza dei diversi campi di natura continua. Le misure geofisiche possono essere applicate in superficie, sotto la superficie topografica ed al di sopra di questa.

Le metodologie geofisiche permettono in generale di contribuire alla soluzione di problemi geologici, geotecnici ed ambientali, contribuendo alla definizione del modello concettuale dell'area di interesse e determinando alcuni tra i principali parametri delle rocce e dei terreni oggetto di studio. La maggior parte dei metodi geofisici non misura direttamente i parametri di progetto ma effettua una correlazione tra i contrasti geofisici misurati e le ipotesi geologiche; questo tipo di correlazioni sono molto spesso empiriche e dipendenti dalla qualità dei risultati e dalle ipotesi fatte.

Nei seguenti paragrafi verranno illustrati e discussi sinteticamente i risultati derivanti dalle indagini geofisiche realizzate nel corso della campagna geofisica effettuata.

Per quanto riguarda i risultati completi relativi a tutte le indagini geofisiche eseguite, si rimanda agli allegati in calce, in cui sono trattate in modo dettagliato.

7.4.1 Prospezione microgravimetrica

La gravimetria è un metodo geofisico che permette, attraverso la misura dell'accelerazione di gravità, di evidenziare variazioni di densità nei terreni che costituiscono il sottosuolo. La gravimetria si fonda sulle differenze tra il valore del campo gravitazionale terrestre misurato in un preciso luogo ed il valore teorico previsto (anomalia). Se nel sottosuolo sono presenti rocce dense, la gravità risulta maggiore rispetto a zone in cui sono presenti terreni a densità minore; allo stesso modo se sono presenti terreni meno densi o cavità ipogee, la gravità risulterà minore rispetto a quella

teorica. Gli apparecchi impiegati per le misure del campo gravitazionale sono i gravimetri, strumenti che determinano differenze di gravità da luogo a luogo con un'altissima sensibilità (0.001 mGal per il microgravimetro).

Per ottenere il valore dell'anomalia di gravità è necessario rimuovere tutti gli effetti non desiderati. Questo è possibile comparando le misure di gravità effettuate (g , gravità osservata) con quelle teoriche che si hanno alla stessa latitudine (G_n , gravità normale), corrette per il dislivello tra la quota del geode (0 m s.l.m.), per la quota della stazione (correzione di Faye) e per rimuovere l'effetto attrattivo dello strato di materiale tra la superficie di riferimento e quella del piano campagna (correzione di Bouguer). Un'ulteriore correzione da apportare viene utilizzata per rimuovere gli effetti attrattivi dati dalla morfologia circostante il punto di misura (correzione topografica). La gravità normale risulta funzione della latitudine, varia in relazione alla distanza tra il geode e il baricentro della Terra, e alla forza centrifuga indotta dalla rotazione intorno all'asse terrestre.

Per maggiori dettagli sulle caratteristiche della strumentazione e delle modalità esecutive della prova, si rimanda alle descrizioni presenti nel report in allegato.

L'indagine microgravimetrica è stata eseguita esclusivamente in località Mola di Regno: in Figura 7.4.1.1 è evidenziata la vista satellitare dell'area di studio.



Fig. 7.4.1.1 In giallo è rappresentata l'area di studio per l'indagine microgravimetrica.

Da Figura 7.4.1.2 alla Figura 7.4.1.6, vengono riportate sinteticamente le principali mappe ricavate dall'analisi microgravimetrica. I risultati dell'indagine microgravimetrica sono stati utilizzati al fine di migliorare il modello concettuale geologico dell'area e nel definire deficit di massa nel sottosuolo connessi con la presenza di cavità sotterranee e relativa suscettibilità al rischio sinkhole.

I risultati delle indagini microgravimetriche eseguite, al fine di verificare la presenza di deficit di massa riconducibili a fenomenologie sinkhole, hanno evidenziato la presenza di anomalie a carattere puntuale che peraltro non interessano il tracciato di progetto (Figura 7.4.1.6).

Tale Figura, denominata "Mappa di sintesi", evidenzia i principali elementi topografici, idrogeologici, gravimetrici e la perimetrazione delle aree a potenziale rischio sinkhole. Si sottolinea la presenza di molteplici anomalie gravimetriche correlabili con aree a potenziale rischio sinkhole, prevalentemente concentrate nel settore centro-meridionale. Si fa notare che i minimi gravimetrici presenti sono caratterizzati da valori e gradienti variabili. Ciò riflette la dimensione dei volumi dei terreni decompressi e/o a rischio sinkhole e la loro posizione rispetto alla superficie topografica.

Le caratteristiche costruttive della nuova opera acquedottistica, che in questo tratto è costituita da uno scatolare in cemento armato giuntato, al cui interno sono alloggiato 2 condotte in acciaio, è perfettamente in grado di assorbire eventuali cedimenti differenziali che in ogni caso saranno monitorati secondo quanto previsto dal Piano Preliminare Geotecnico e Strutturale di cui all'Elaborato A250PDS R019.

Si rappresenta infine che, ad oggi, relativamente alle infrastrutture acquedottistiche esistenti, non sono state mai riscontrate problematiche di dissesto riconducibili ad effetti di subsidenza indotti da processi di piping sinkhole.

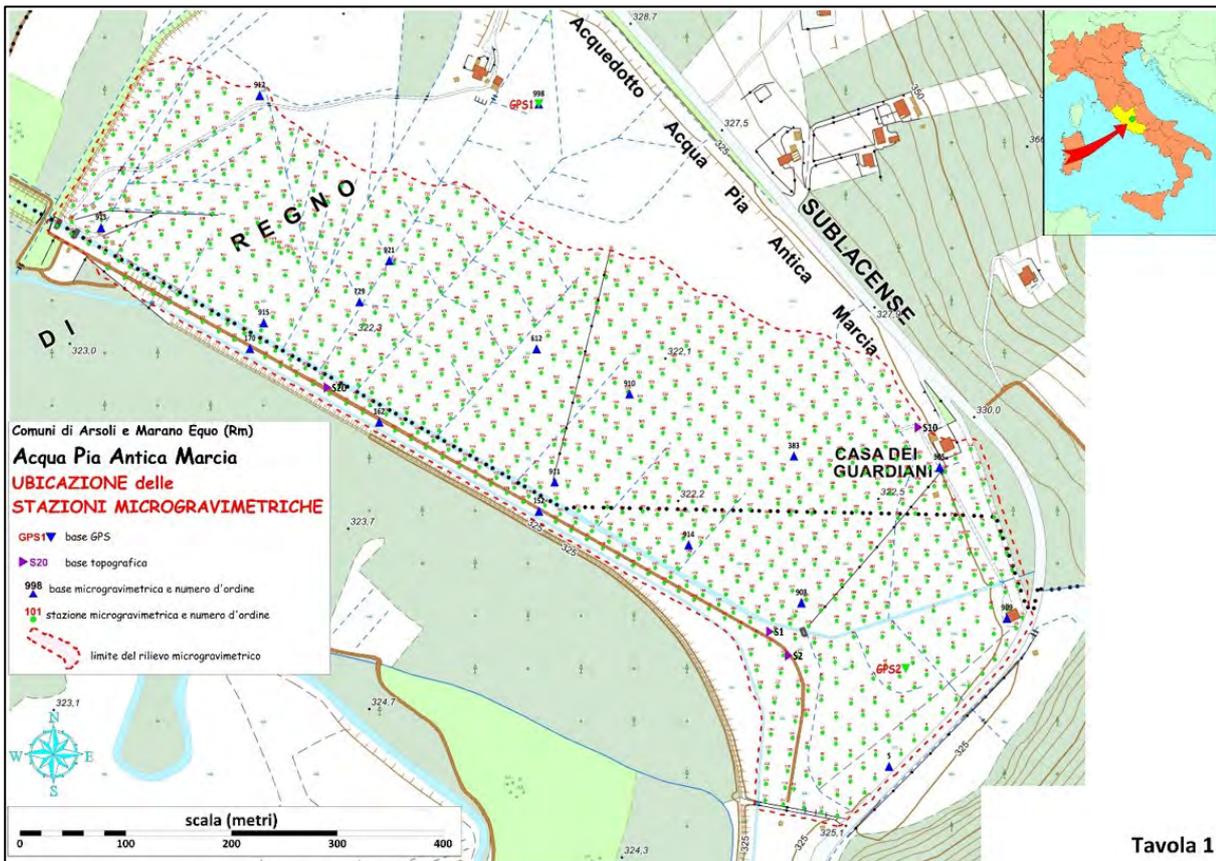


Fig. 7.4.1.2: Ubicazione delle Stazioni Microgravimetriche.

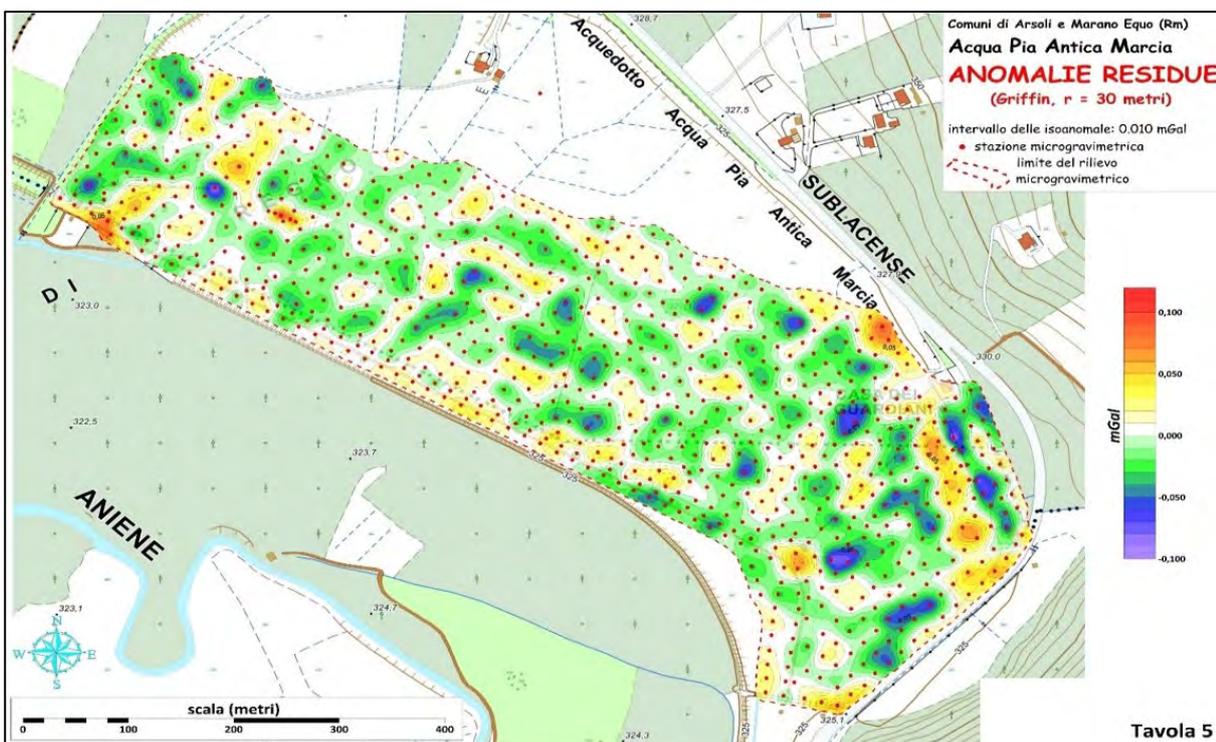


Fig. 7.4.1.3: Mappa delle Anomalie di Residue (Griffin r = 30 m).

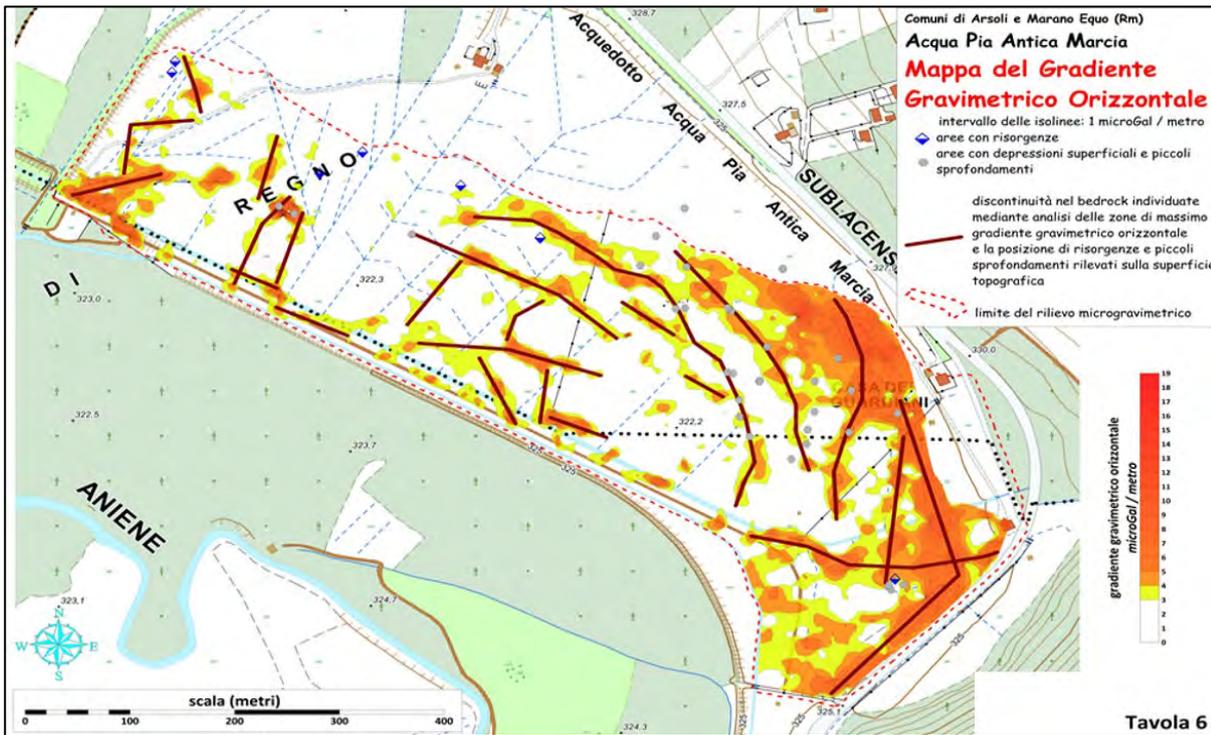


Fig. 7.4.1.4: Mapa del Gradiente Gravimetrico Orizzontale.

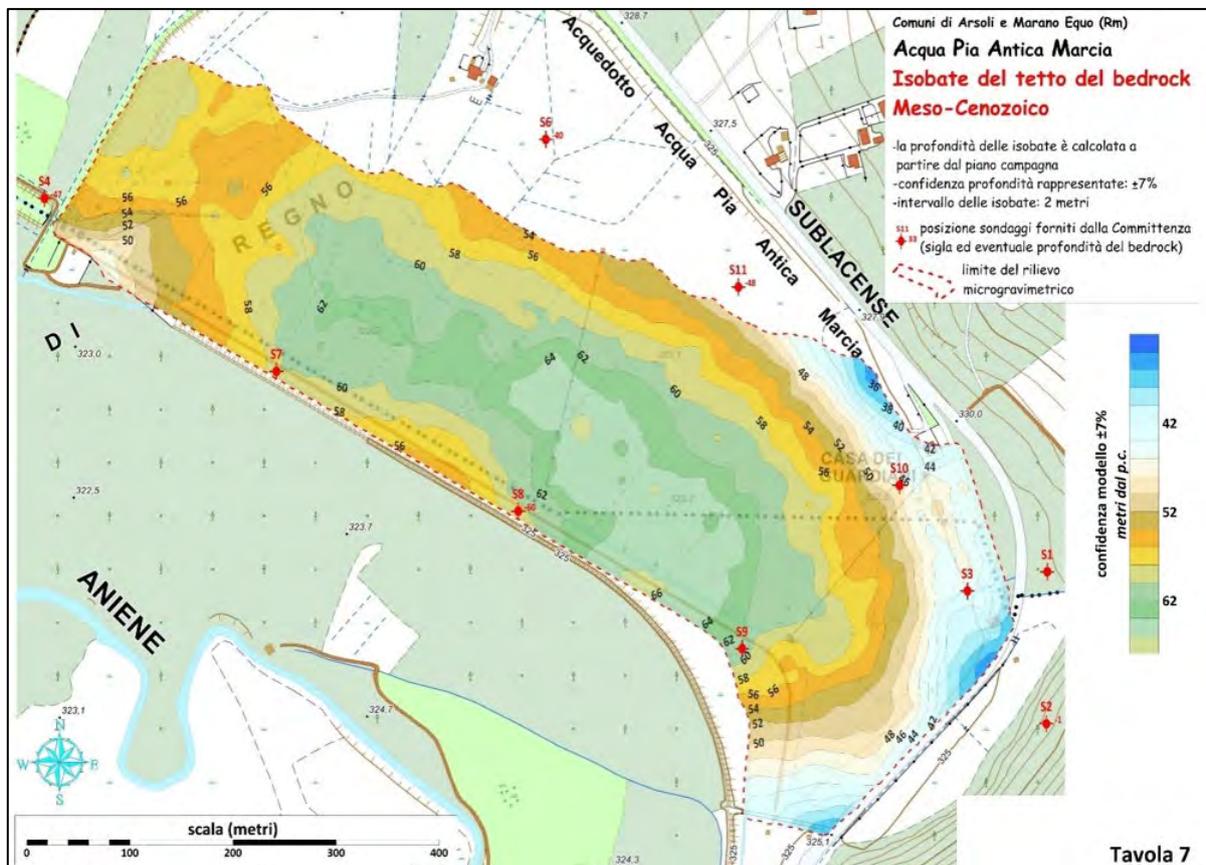


Fig. 7.4.1.5: Mapa delle isobate del tetto del bedrock Meso-Cenozoico.

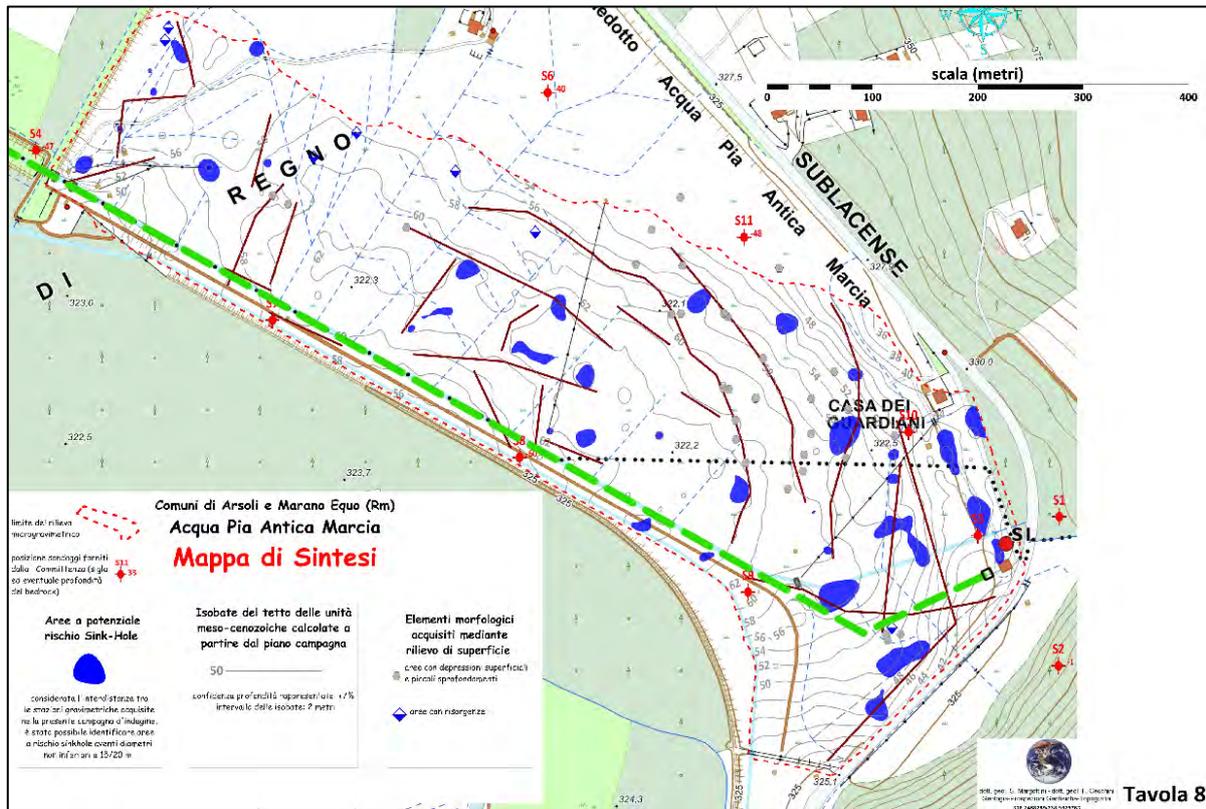


Fig. 7.4.1.6: Mapa operativa di sintesi.

7.4.2 Prospezioni geoelettriche con tecnica tomografica 2D e 3D

La tomografia elettrica consiste nella determinazione di profili di resistività dei terreni indagati attraverso la disposizione sul suolo di un numero elevato di elettrodi, che progressivamente vengono spostati lungo una data direzione variandone la distanza interelettrodica al fine di aumentare la profondità di investigazione. I dati così ottenuti consentono la costruzione di una matrice di valori di resistività la cui inversione, mediante algoritmi matematici, restituisce la definizione del mezzo investigato in immagini di elettro-resistive.

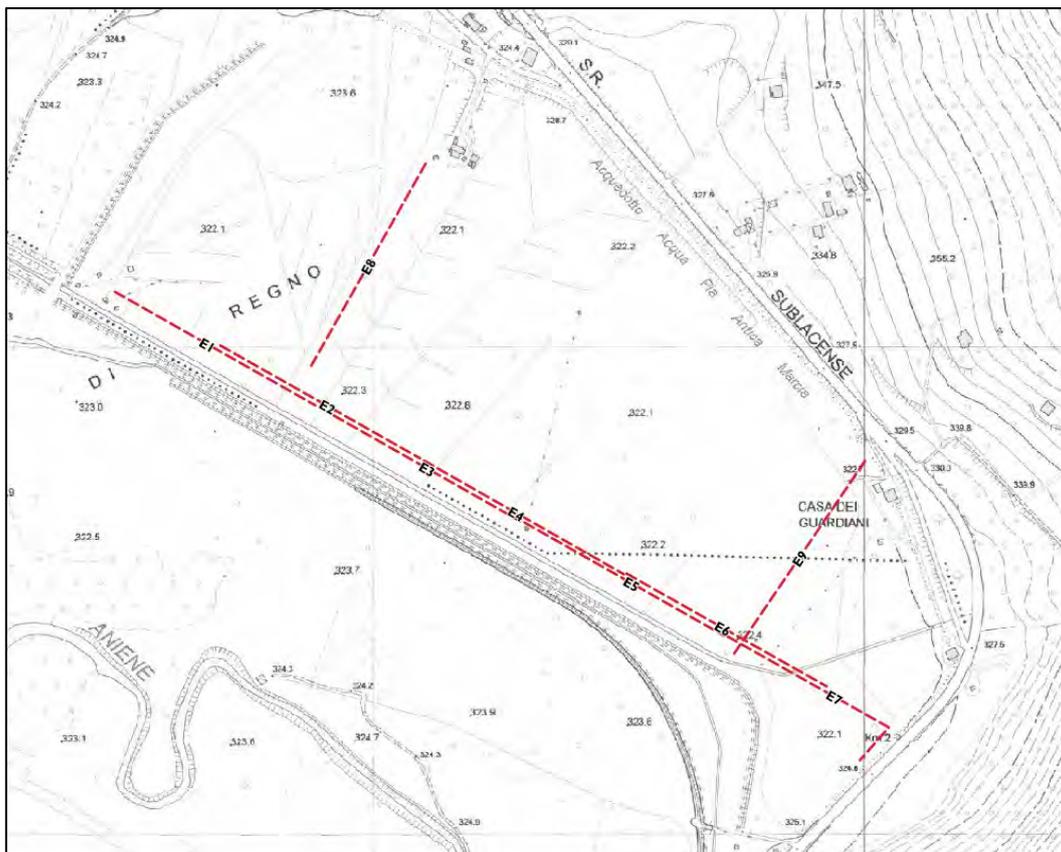
Nello specifico, si parla di tomografia elettrica bidimensionale (2D) se il sottosuolo è indagato lungo una sezione piana verticale e gli elettrodi, disposti sulla superficie del terreno, sono allineati ed equidistanti; invece, nella tomografia elettrica tridimensionale (3D) si analizza un intero volume di sottosuolo e gli elettrodi sono posti nei nodi di una griglia sulla superficie del terreno stesso.

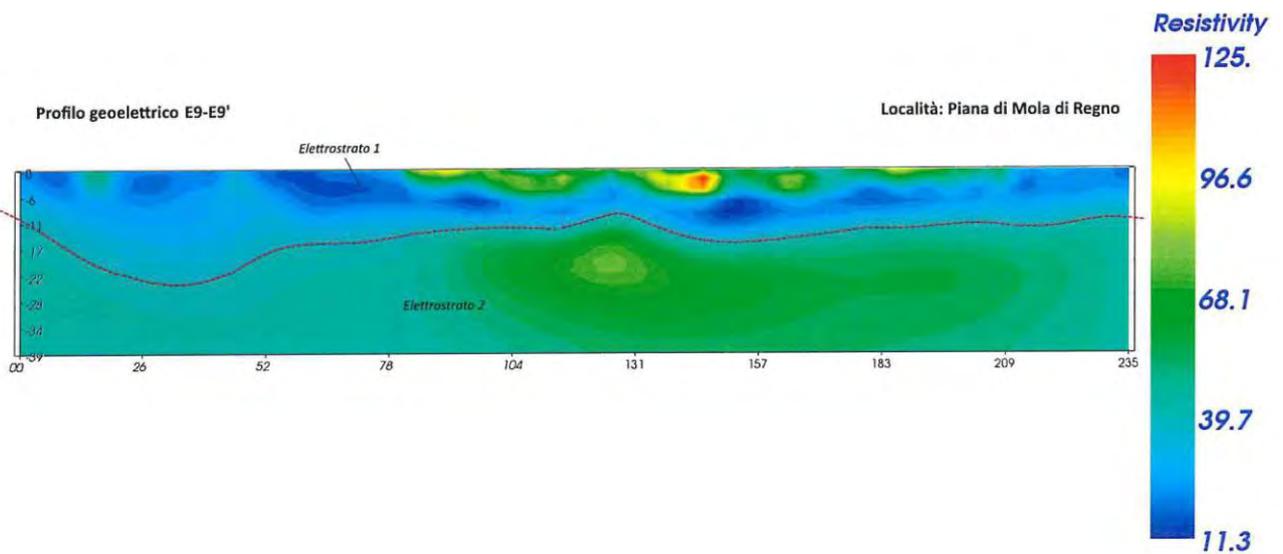
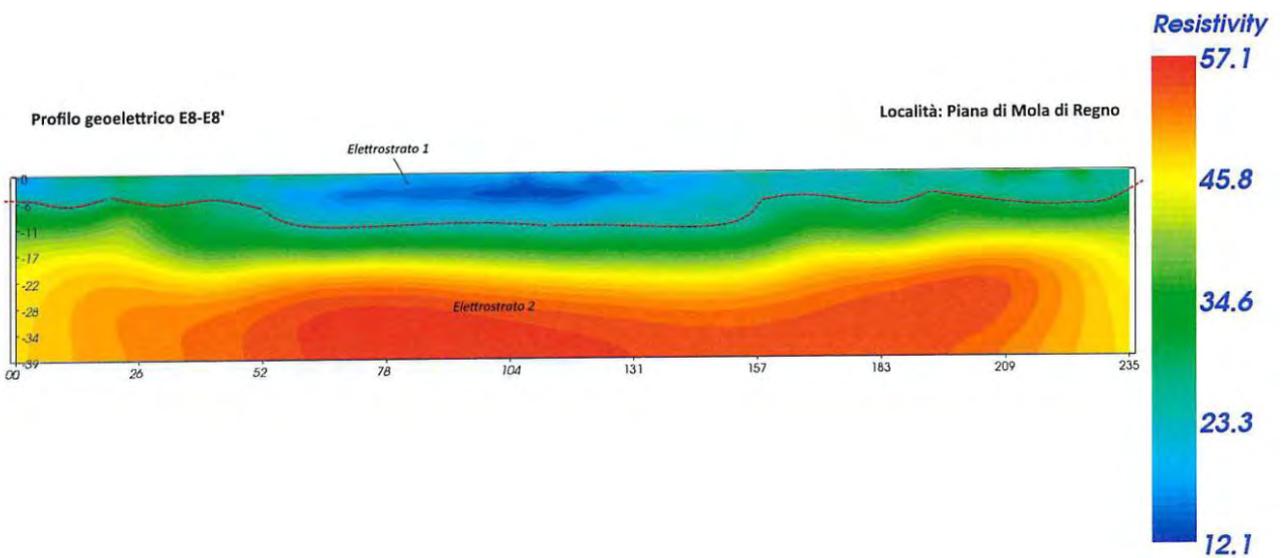
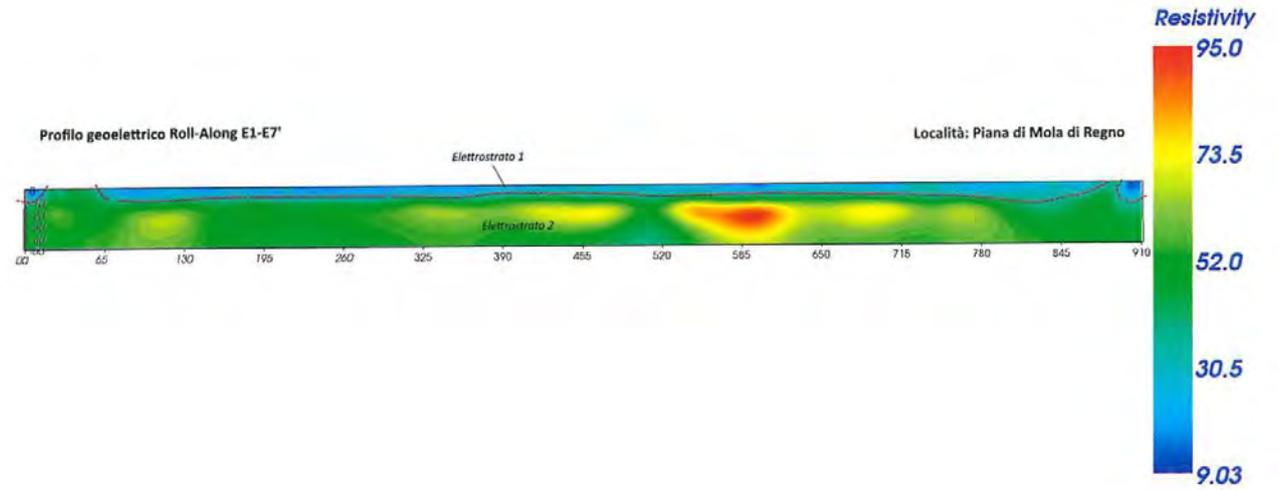
Le tecniche tomografiche elettriche consentono di definire volumetricamente con ottime risoluzioni latero-verticali ammassi sepolti. In particolare, sono indicate per individuare cavità, ricostruzioni morfologiche di substrati o superfici di falda.

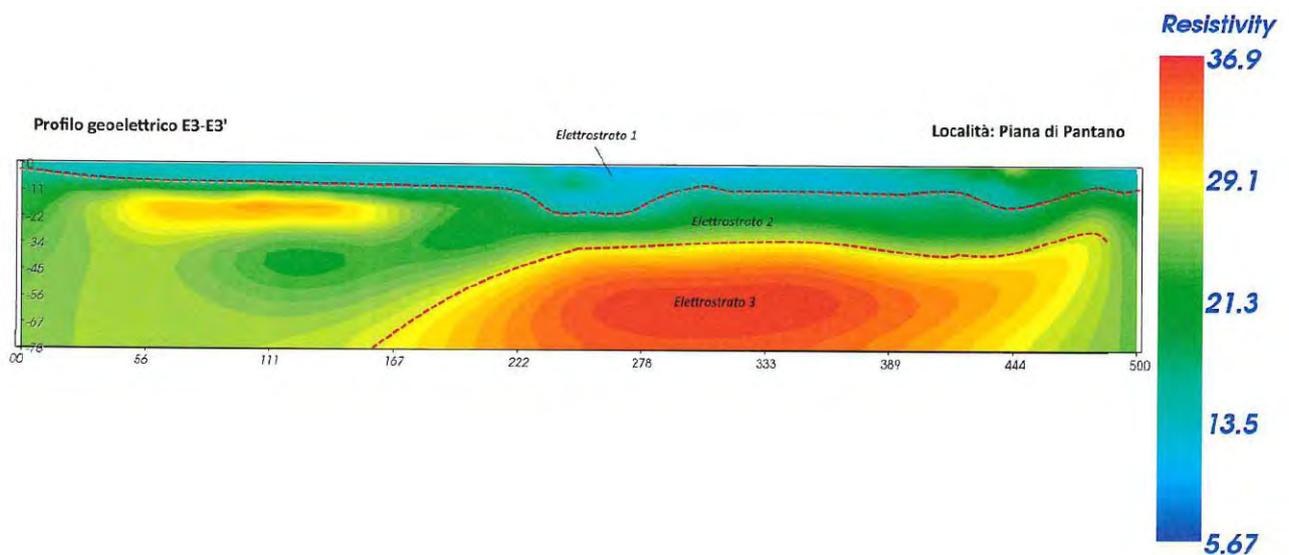
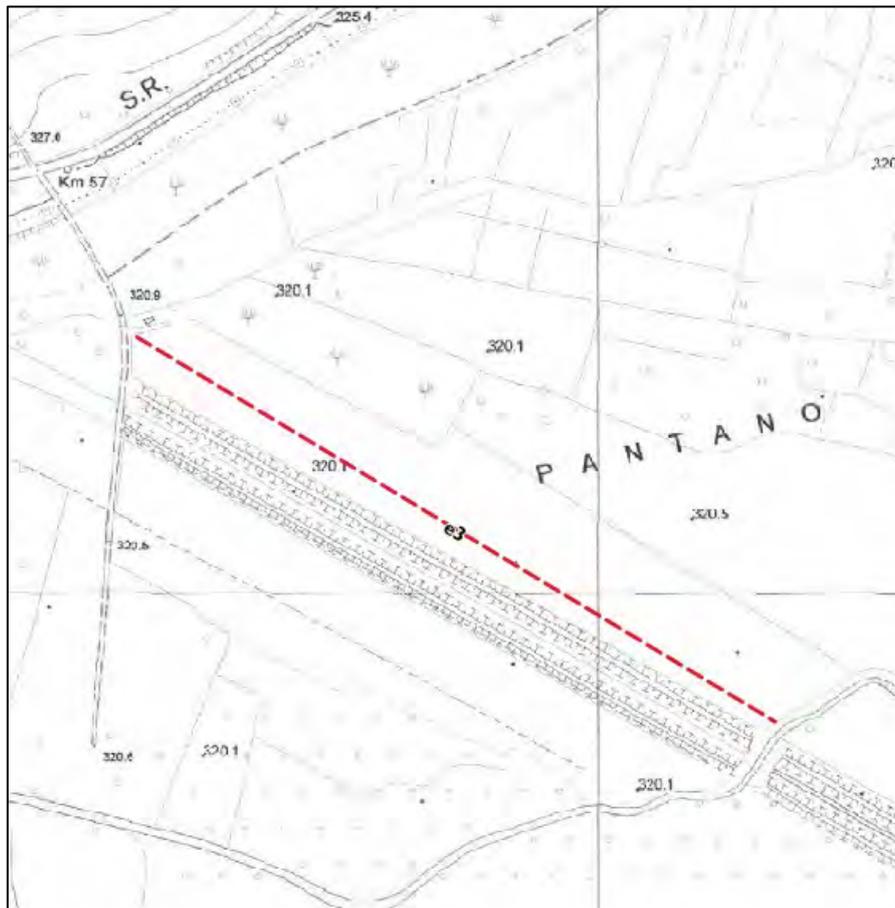
Le indagini geoelettriche eseguite durante la campagna geofisica sono elencate nella Tabella 7.4.2.1, riportando la resistività media degli elettrostrati individuati. I risultati delle indagini geoelettriche sono stati utilizzati per migliorare la ricostruzione del modello concettuale geologico dell'area di interesse. In particolare, le prospezioni geoelettriche sono state effettuate principalmente sui depositi alluvionali del Fiume Aniene, andandone a caratterizzare, specialmente per le parti più superficiali, la geometria dei corpi sepolti. Stante i range di resistività desunti dalle varie prove, si può stimare che i depositi alluvionali siano caratterizzati generalmente da basse resistività, compatibili sia con la presenza di litologie in cui è presente sempre una certa percentuale di granulometria fine (argille e limi) sia con la presenza di falde acquifere abbastanza superficiali. Le tomografie elettriche di dettaglio, le cui sezioni bidimensionali e tridimensionali definiscono la geometria degli elettrostrati di ogni stesa geoelettrica, sono visionabili nei report in allegato.

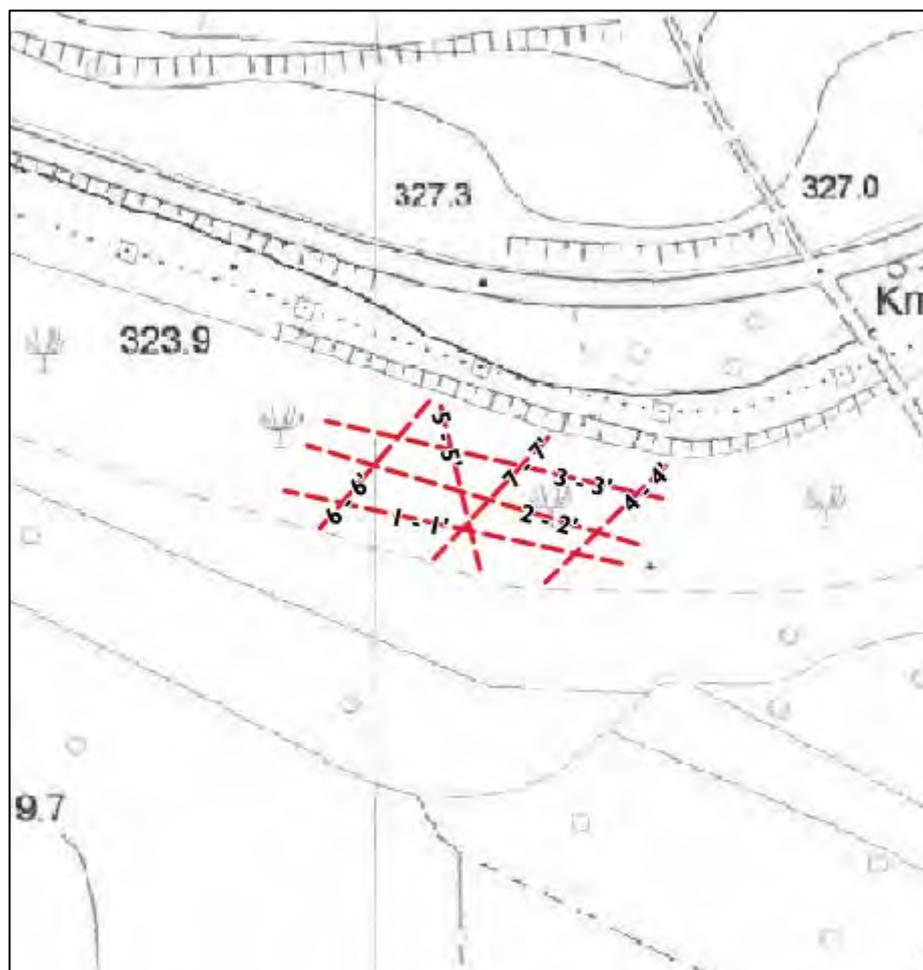
Tabella 7.4.2.1: Risultati delle prospezioni geoelettriche.

Codice Indagine Geofisica	Località	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Risultati indagine
da E1-E1' a E9-E9'	Mola di Regno	42° 00' 42.18"	13° 01' 26.99"	Elettrostrato 1 : resistività 20-30 Ω *m Elettrostrato 2 : resistività 50-80 Ω *m
e3-e3'	Pantano	42° 01' 02.05"	13° 00' 16.43"	Elettrostrato 1 : resistività 15 Ω *m Elettrostrato 2 : resistività 20-30 Ω *m Elettrostrato 3 : resistività 35 Ω *m
da 1-1' a 7-7'	Roviano - Nuovo Snodo A	42° 01' 82.68"	13° 00' 08.48"	Elettrostrati: resistività varia da 1 a 226 Ω *m
da T.E.1 a T.E.9	Roviano - Ponte Anticoli	42° 01' 20.06"	12° 59' 26.42"	Elettrostrati: resistività varia da 10 a 300 Ω *m

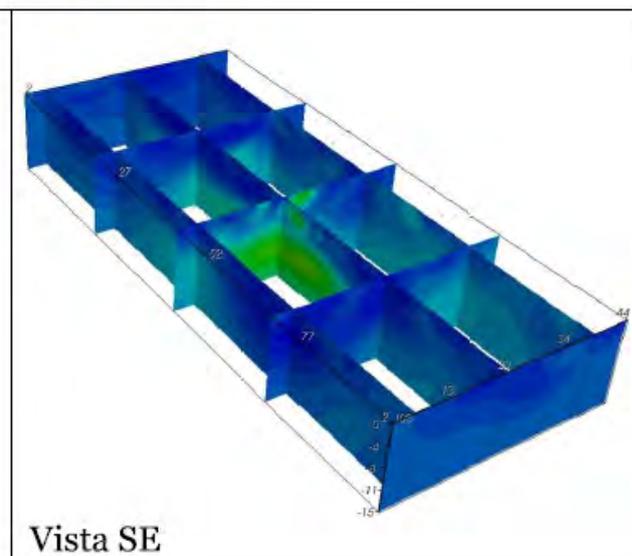
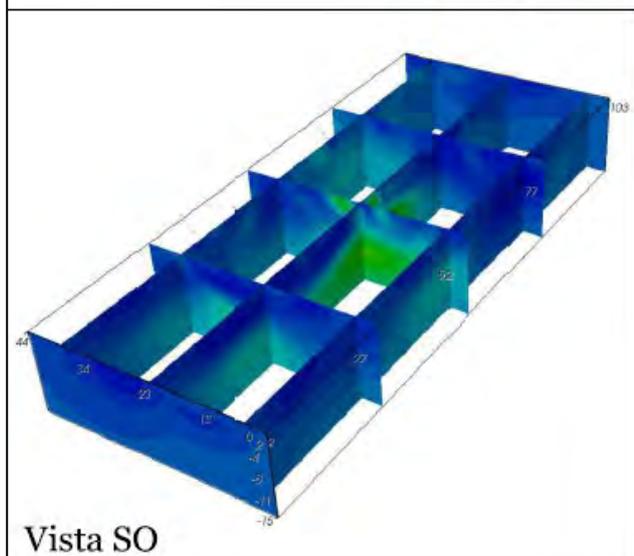
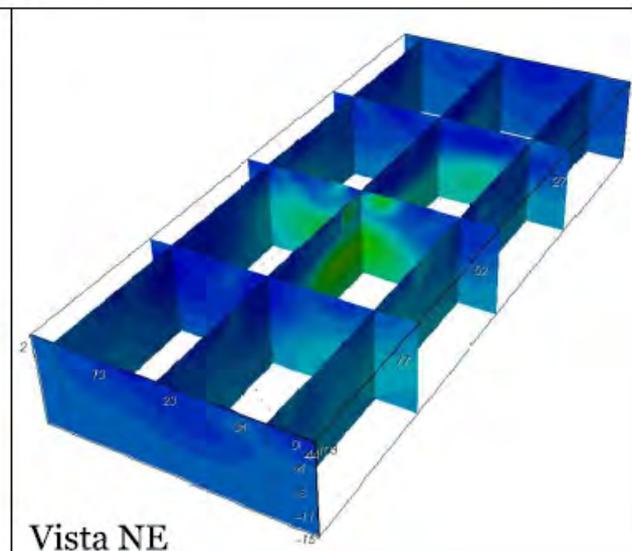
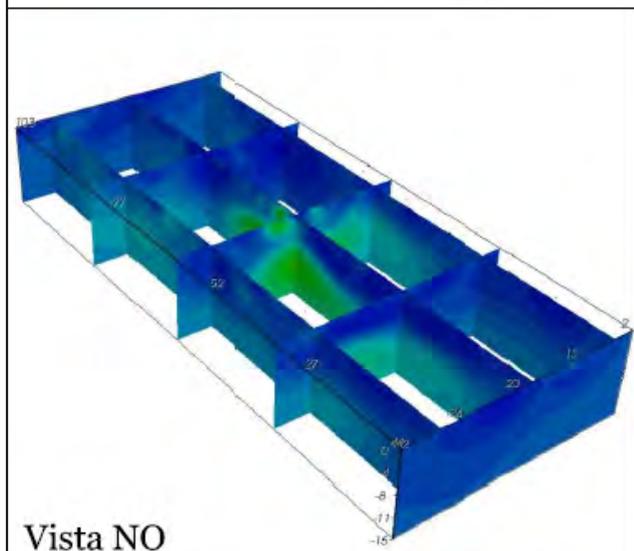






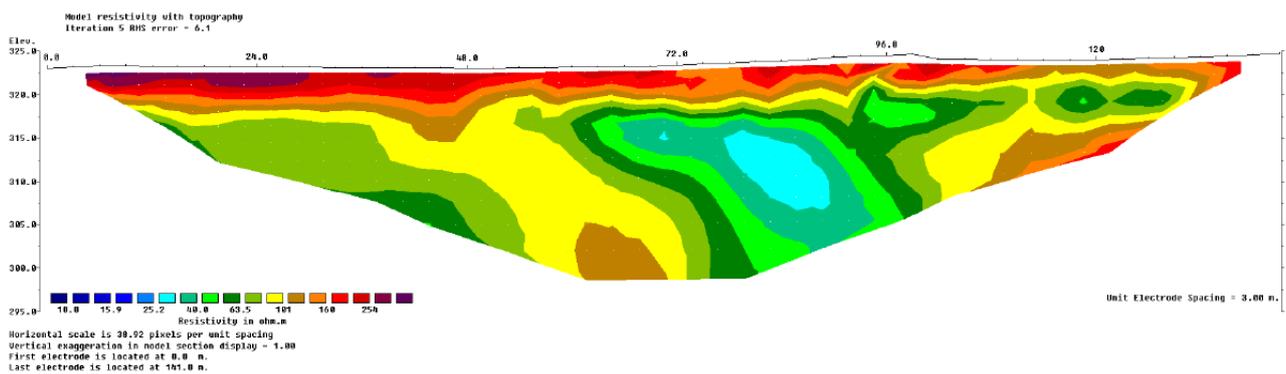


Rappresentazioni delle sezioni verticali

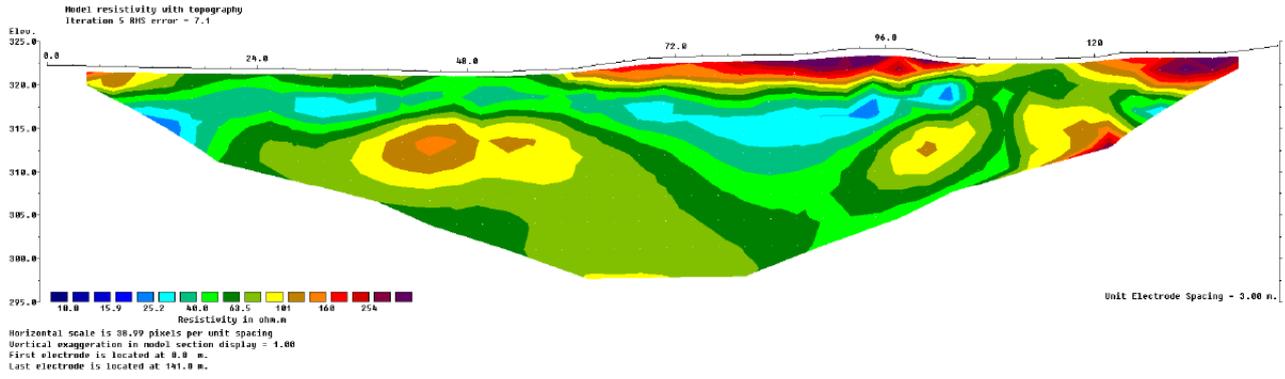




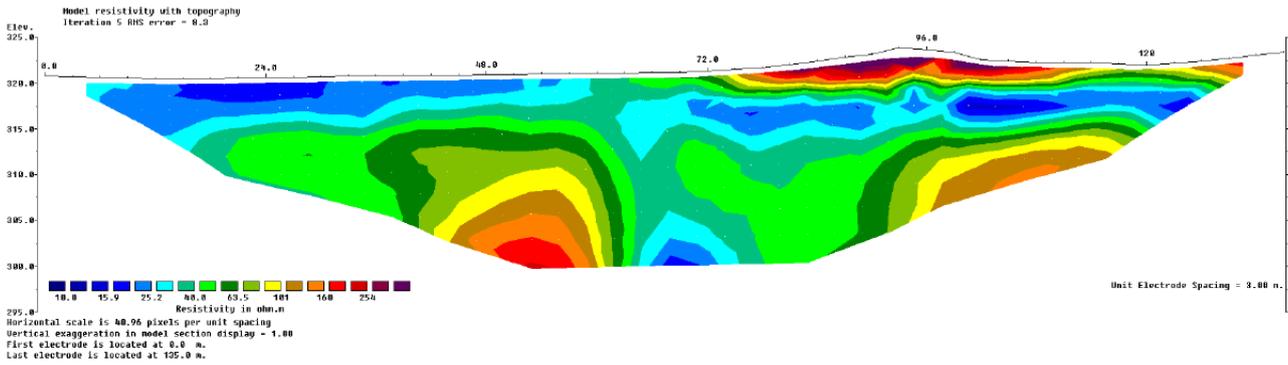
T.E. 1



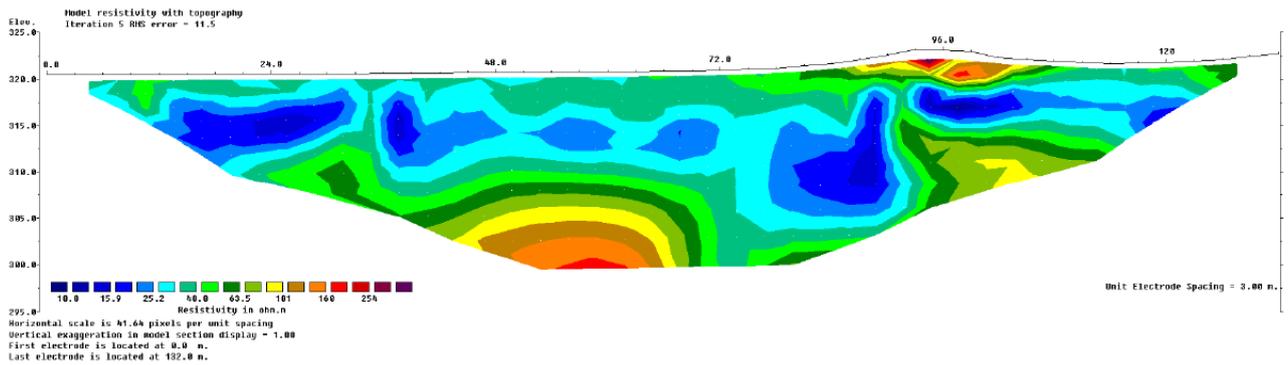
T.E. 2



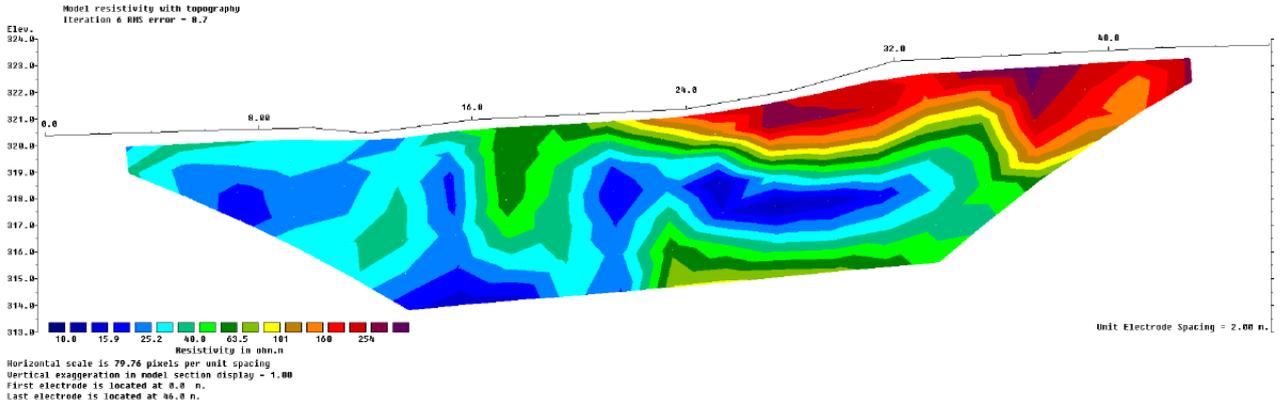
T.E. 3



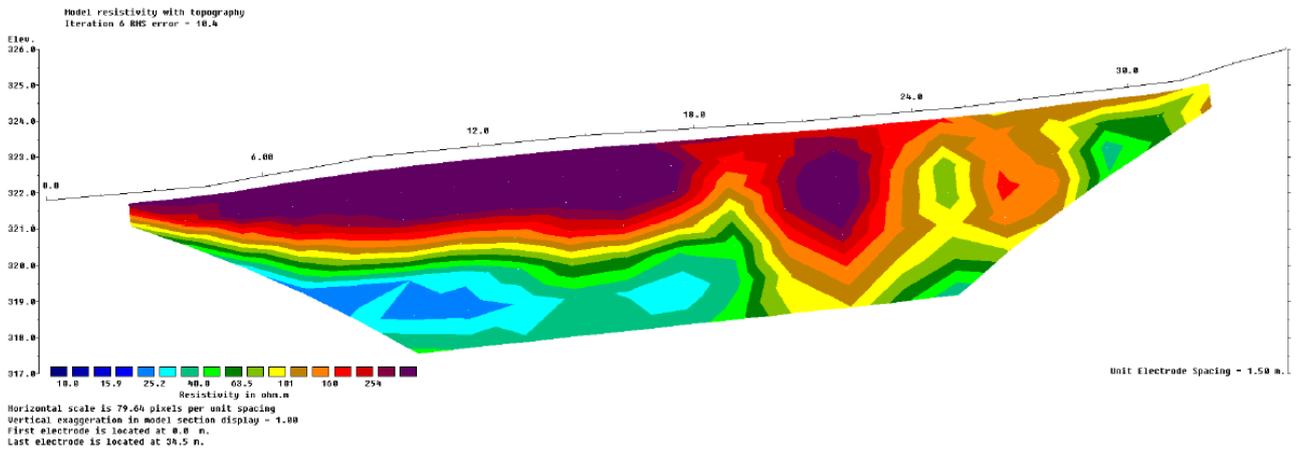
T.E. 4



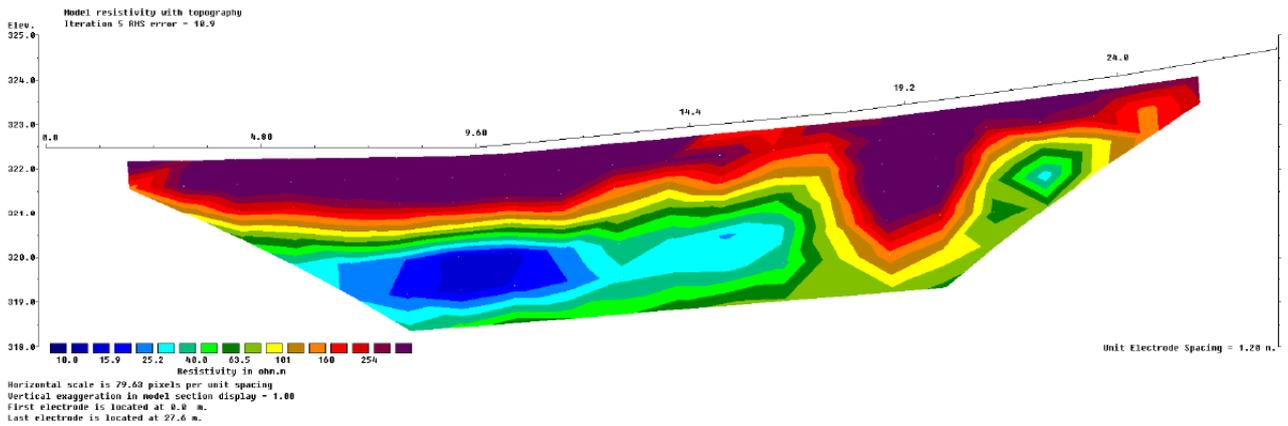
T.E. 5



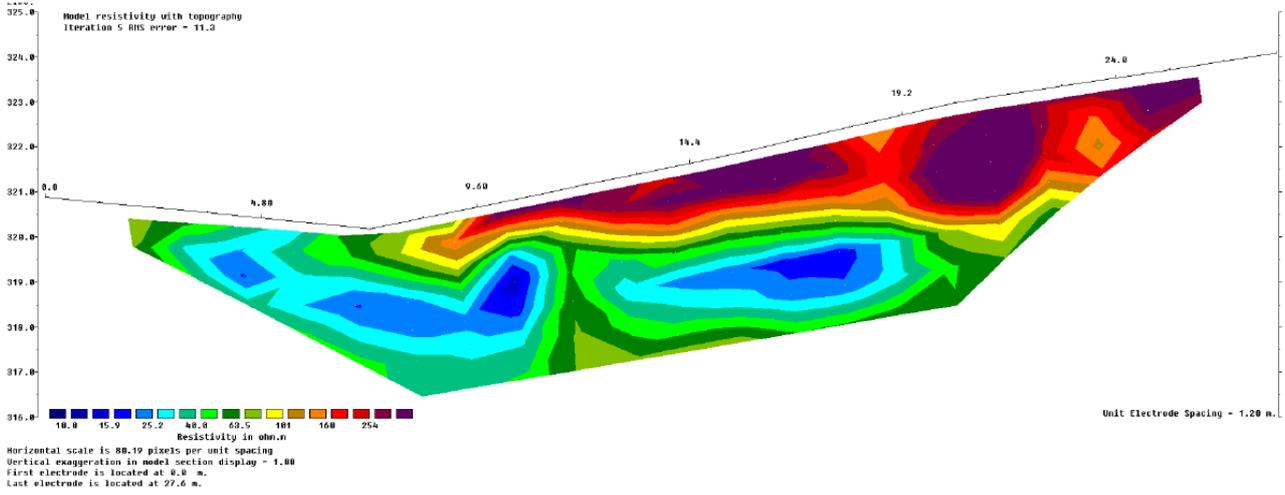
T.E. 6



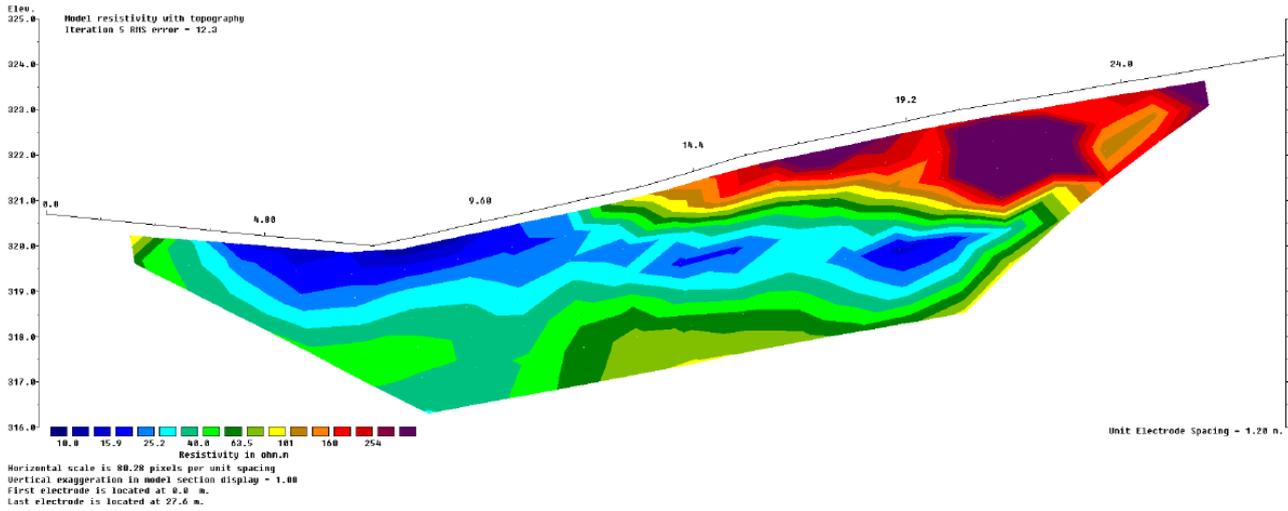
T.E. 7



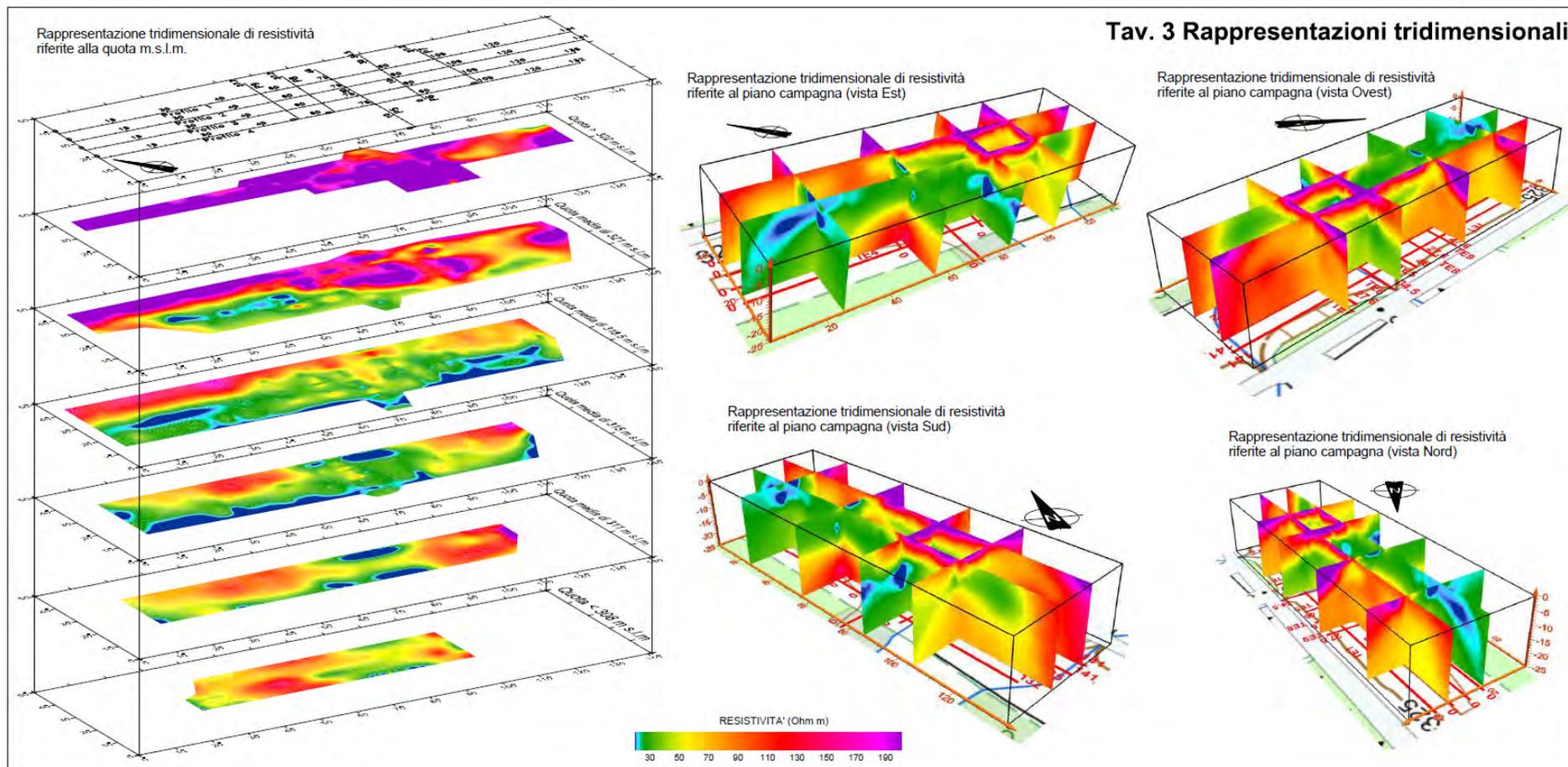
T.E. 8



T.E. 9



Tav. 3 Rappresentazioni tridimensionali



7.4.3 Prospezioni sismiche a rifrazione con tecnica tomografica

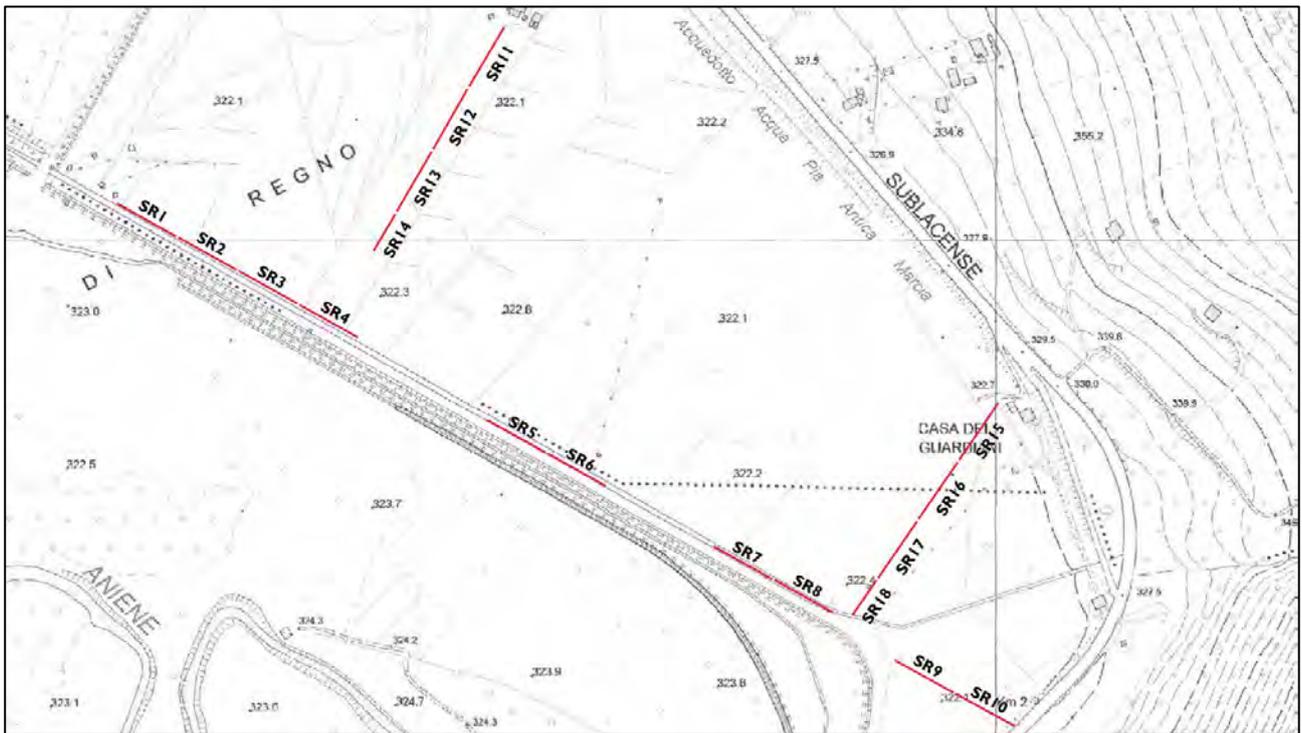
Il metodo di indagine è basato sulla misura dei tempi di percorso che le onde elastiche longitudinali (onde P - più veloci) e trasversali (onde S - più lente), generate da un'esplosione o da un impatto, impiegano a raggiungere una serie di ricevitori (geofoni) opportunamente allineati sul terreno. Con i tempi di percorso si tracciano i diagrammi tempi - distanze (dromocrone) che consentono di calcolare le velocità di propagazione delle onde e lo spessore degli strati interessati dai percorsi delle stesse onde elastiche. Con cinque o più punti di scoppio opportunamente ubicati è possibile determinare l'andamento degli strati anche qualora le superfici di separazione degli stessi siano inclinate oppure ondulate, in questi ultimi casi un numero maggiore di energizzazioni consente una migliore definizione della geometria. Il metodo di elaborazione con tecnica tomografica permette la ricostruzione di situazioni stratigraficamente complesse non risolvibili con altre tecniche di indagine sismica, limitando i problemi derivanti dalla presenza di strati con spessore particolarmente ridotto ed evidenziando in alcuni casi la eventuale presenza di zone a velocità inferiore.

L'elaborazione delle prospezioni sismiche restituisce sismosezioni caratterizzate dalla presenza di terreni dotati di velocità regolarmente crescenti con la profondità. Ai fini degli interventi da realizzare assume particolare importanza la valutazione dell'escavabilità dei terreni in sito. Tale parametro è stato ricavato dal valore della velocità delle onde sismiche V_p , attraverso l'esecuzione di prospezioni sismiche a rifrazione elaborate con tecnica tomografica. Per maggiori dettagli sulle caratteristiche della strumentazione e delle modalità esecutive della prova, si rimanda alle descrizioni presenti nei report in allegato. Le indagini di sismica a rifrazione effettuate sono riportate in Tabella 7.4.3.1. Vengono fornite le ubicazioni d'indagine, assieme alle località limitrofe ed i risultati della velocità delle onde nei vari sismostrati e nei relativi rifrattori (con indicazione di profondità del rifrattore qualora mediabile lungo lo stendimento sismica). I risultati delle indagini di sismica a rifrazione sono stati utilizzati per migliorare la ricostruzione del modello concettuale geologico dell'area di interesse e la caratterizzazione sismica dell'area. In particolare, le prospezioni di sismica a rifrazione hanno permesso di valutare caratteristiche sismiche dei depositi alluvionali e talora di effettuare una stima locale degli spessori. Le restituzioni grafiche 2D di ogni stendimento sismico, riportanti le caratteristiche della strumentazione, le modalità

esecutive della prova, i risultati e le informazioni di dettaglio registrate su ogni stendimento, sono visionabili nei report in allegato.

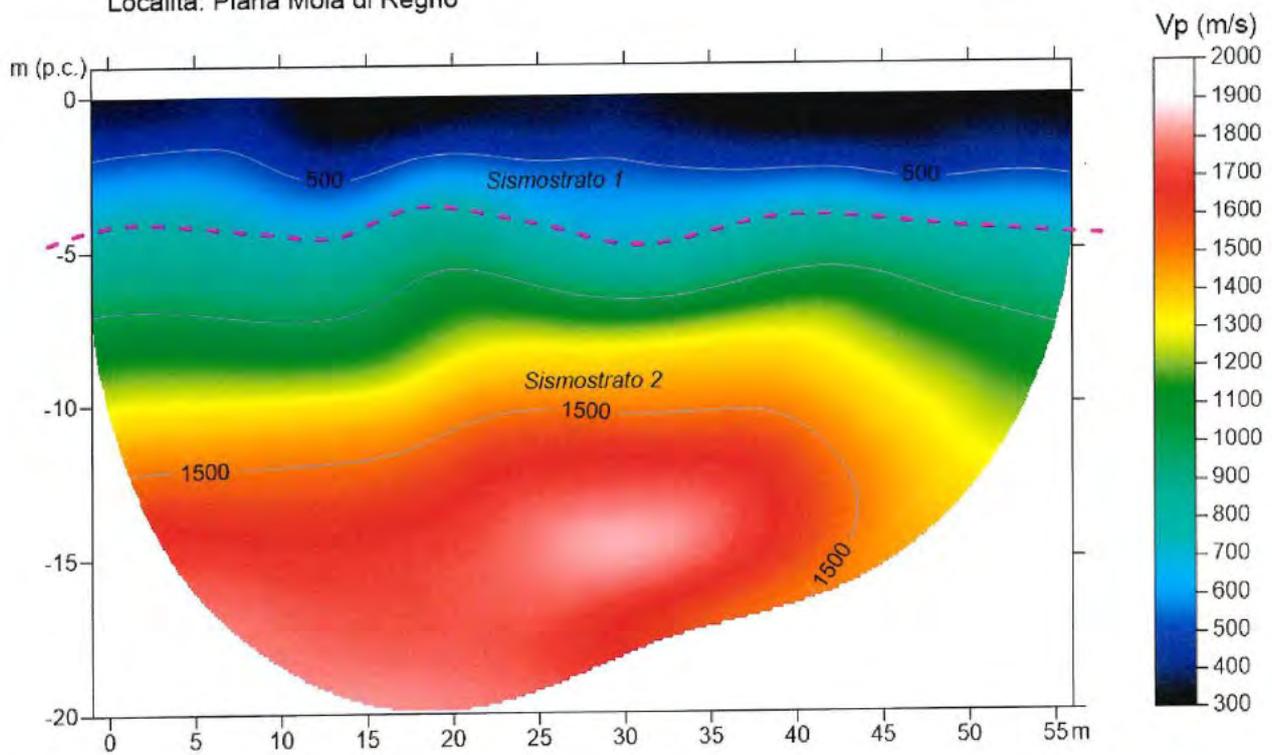
Tabella 7.4.3.1: Risultati della sismica a rifrazione

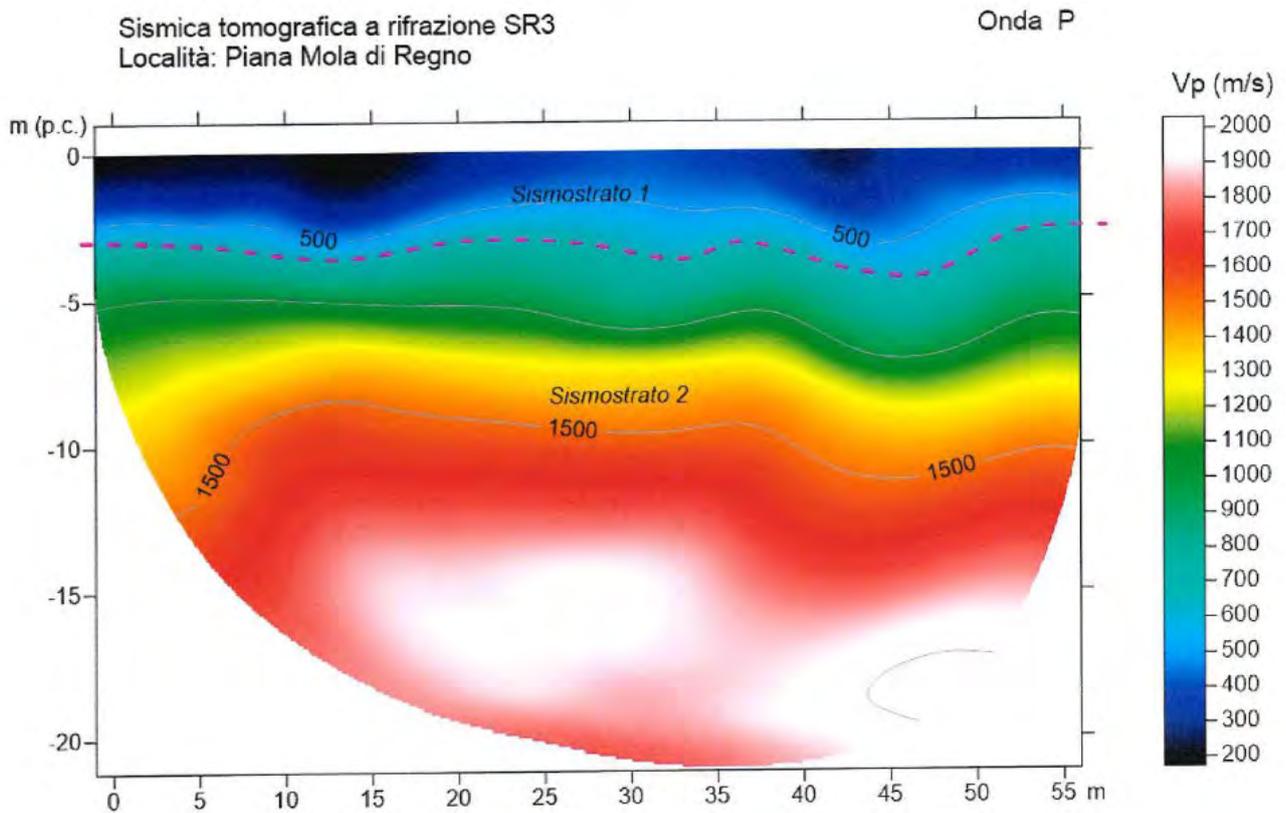
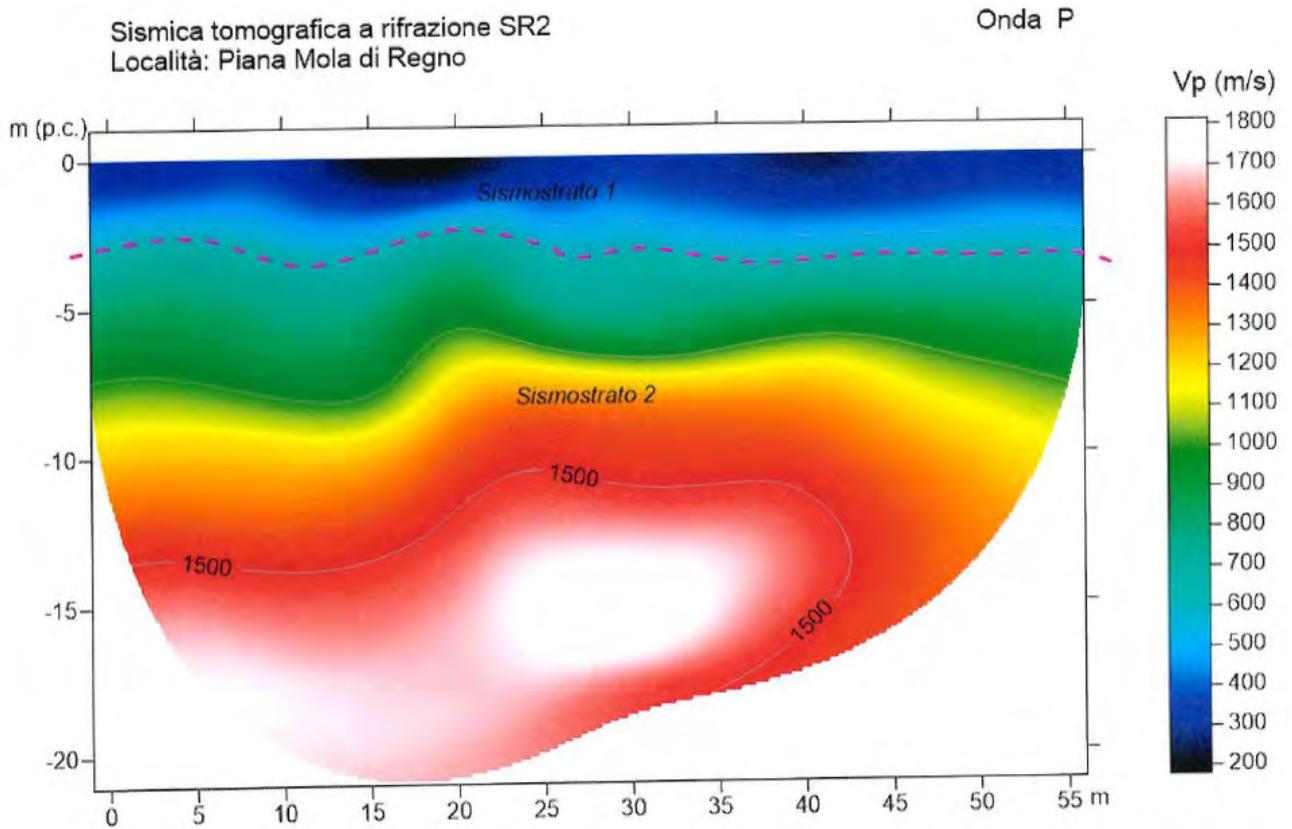
Codice Indagine Geofisica	Località	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Risultati indagine
da SR1 a SR18; da PSR1 a PSR3	Mola di Regno	42° 00' 42.18"	13° 01' 26.99"	Sismostrato 1: Vp= 500 m/s Vs= 240 m/s Sismostrato 2: Vp= 1500 m/s Vs= 600 m/s
SR4 SR5 SR6 SR7	Pantano	42° 00' 58.76"	13° 00' 15.93"	Sismostrato 1: Vp= 500 m/s Vs= 200 m/s Sismostrato 2: Vp= 1500 m/s Vs= 600 m/s Sismostrato 3: Vp= 2000 m/s Vs= 900 m/s
PSR 4	Roviano - Ponte Anticoli	42° 01' 20.06"	12° 59' 26.42"	Sismostrato 1 (tra 6 e 14 m): Vp= 1500 m/s Substrato rifrattore Vp = 2000 m/s
PSR 3	Roviano - Vecchia ferrovia Lato	42°02' 01.71"	12° 57' 36.65"	Sismostrato 1 (tra 12 e 24 m): Vp= 1100 m/s Substrato rifrattore Vp= 2300 m/s
PSR 2	Roviano - Vecchia ferrovia Lato Est	42° 01' 55.90"	12° 58' 07.50"	Sismostrato 1 (tra 3 e 3.5 m): Vp= 520-540m/s e Vsh= 180-210 m/s Sismostrato 2 (a 18 m): Vp= 1610-1660 m/s e Vsh=320-350 m/s Substrato rifrattore Vp= 2200-2240 m/s e Vsh= 480-500 m/s
PSR 1	Roviano - Vecchia ferrovia Lato Est	42° 01' 55.90"	12° 58' 07.50"	Sismostrato 1 (tra 3 e 3.5 m): Vp= 520-540m/s e Vsh= 180-210 m/s Sismostrato 2 (a 18 m): Vp= 1610-1660 m/s e Vsh=320-350 m/s Substrato rifrattore Vp= 2200-2240 m/s e Vsh= 480-500 m/s



Sismica tomografica a rifrazione SR1
Località: Piana Mola di Regno

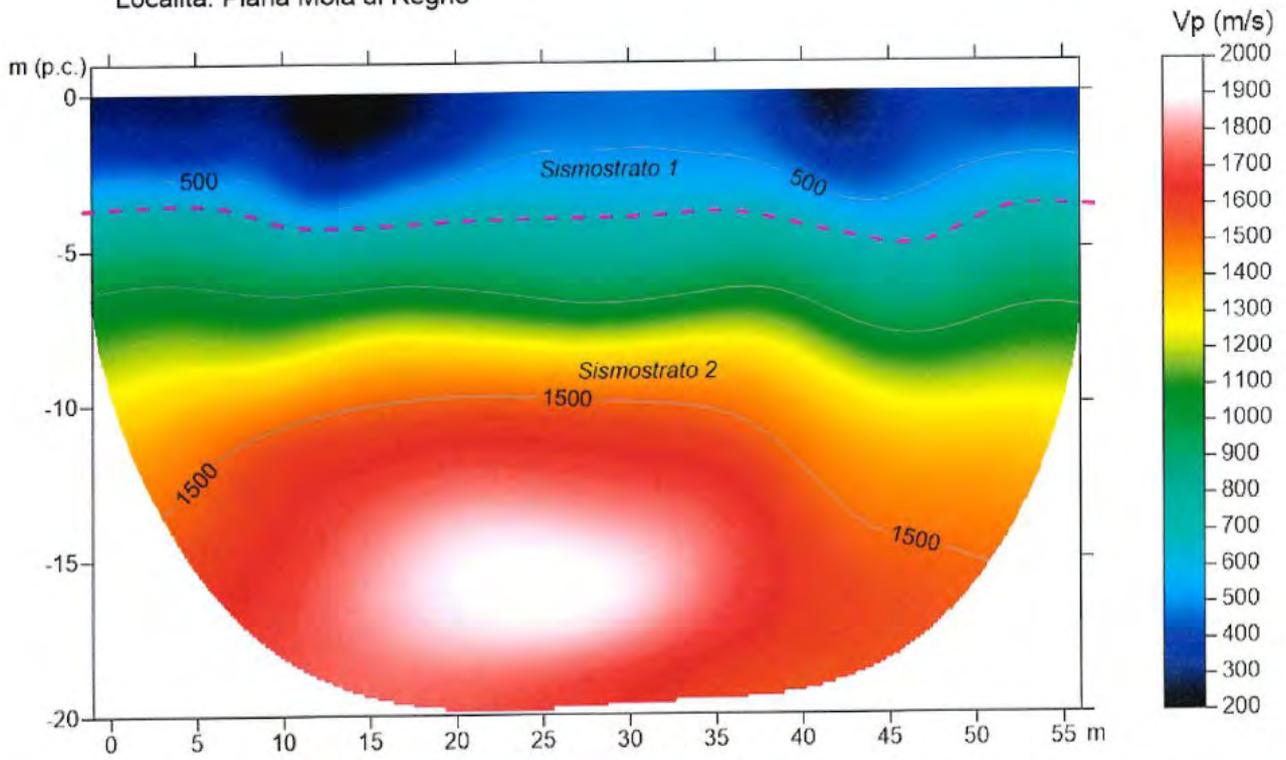
Onda P





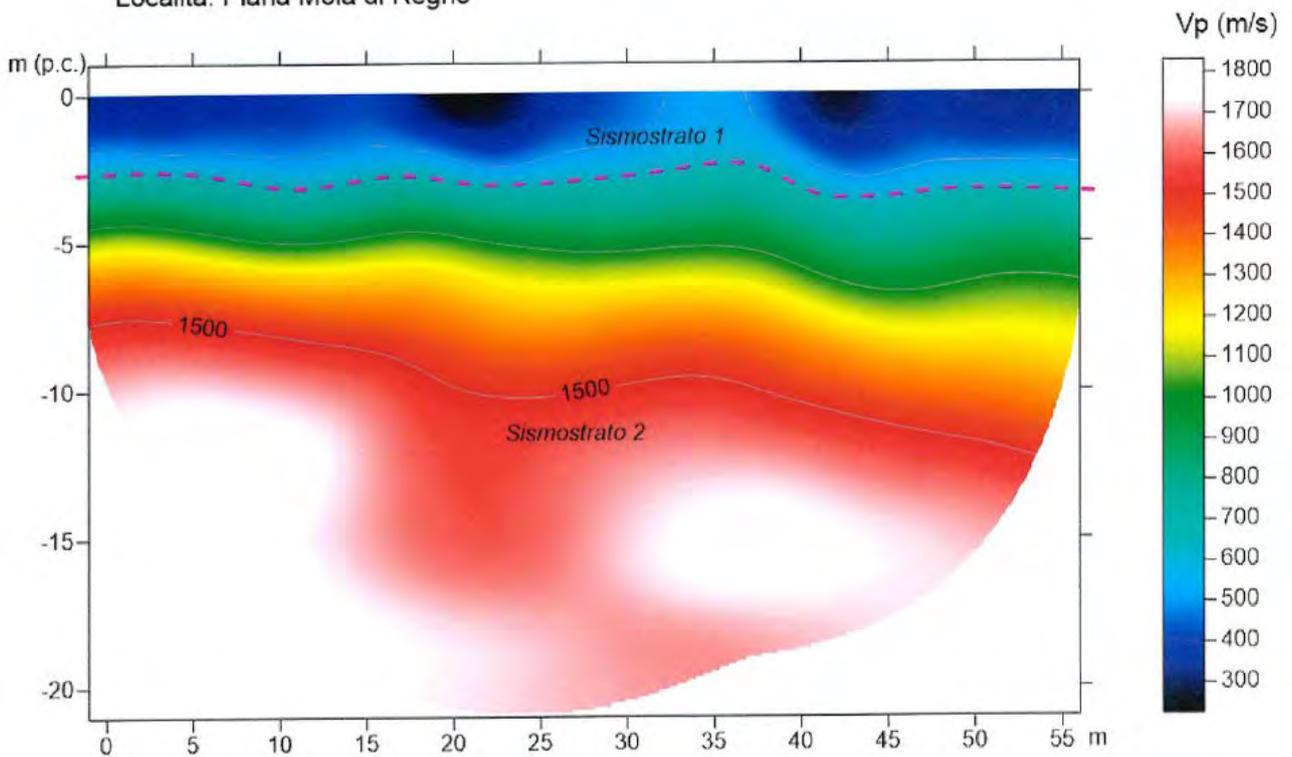
Sismica tomografica a rifrazione SR4
Località: Piana Mola di Regno

Onda P



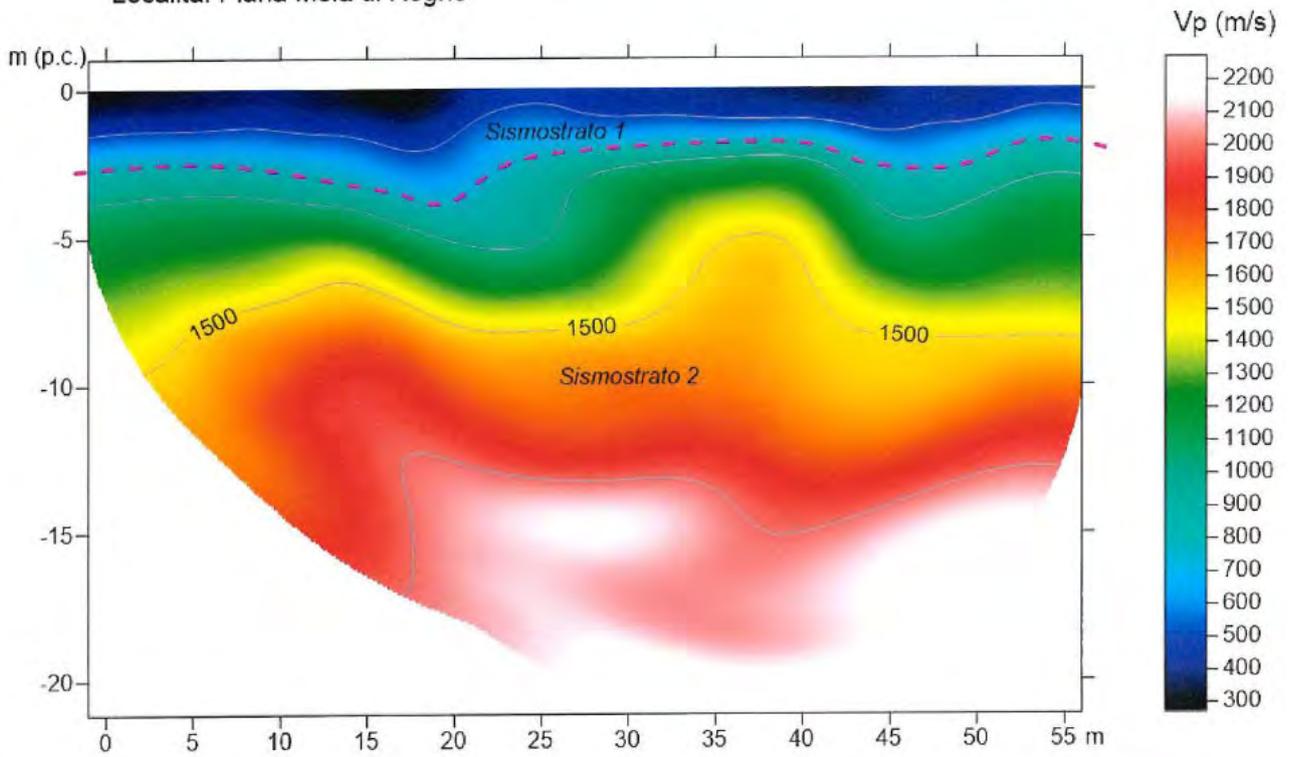
Sismica tomografica a rifrazione SR5
Località: Piana Mola di Regno

Onda P



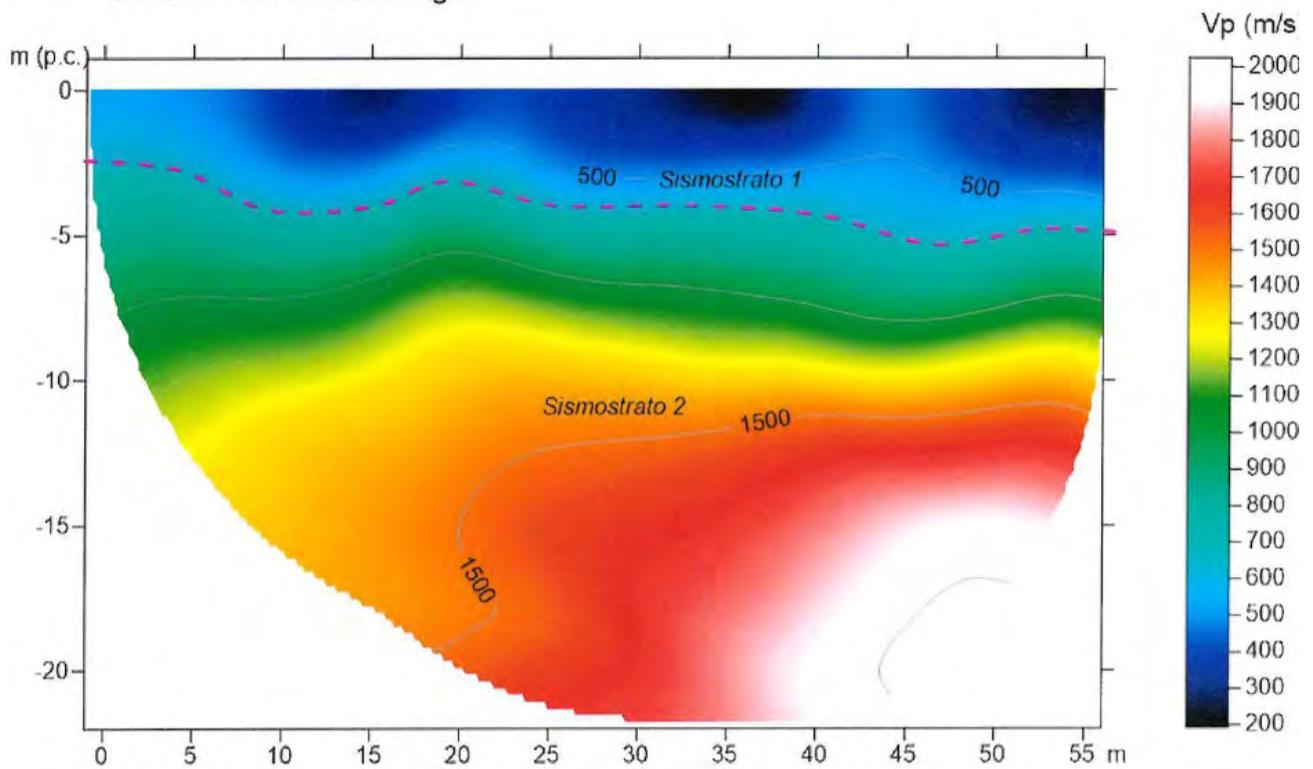
Sismica tomografica a rifrazione SR6
Località: Piana Mola di Regno

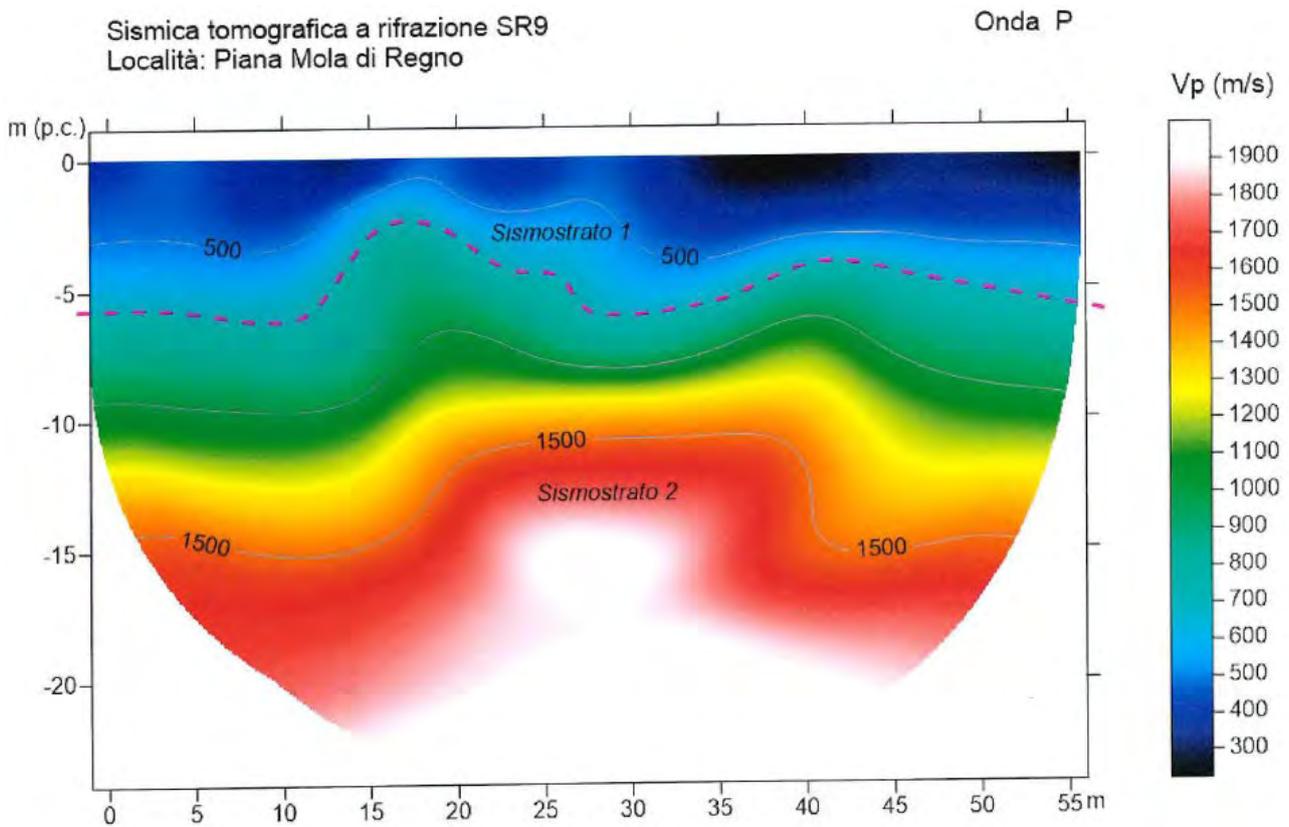
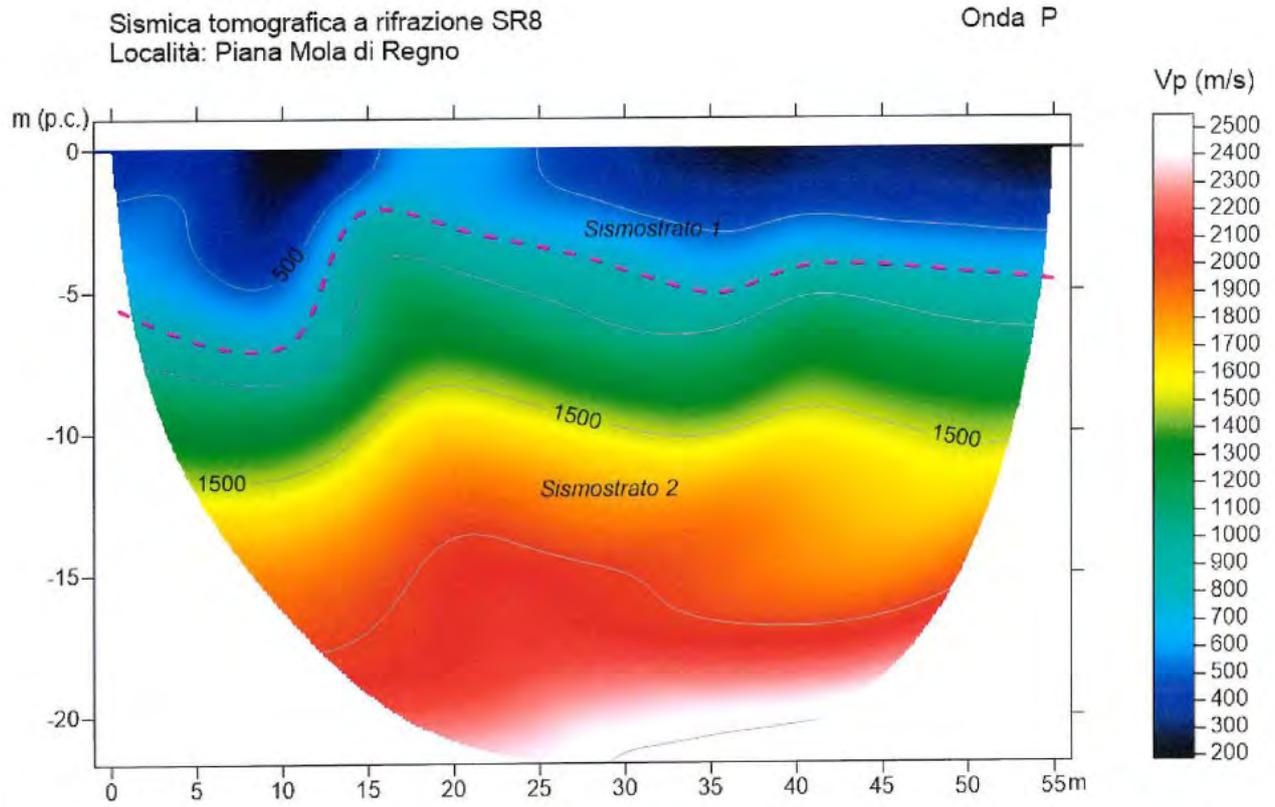
Onda P

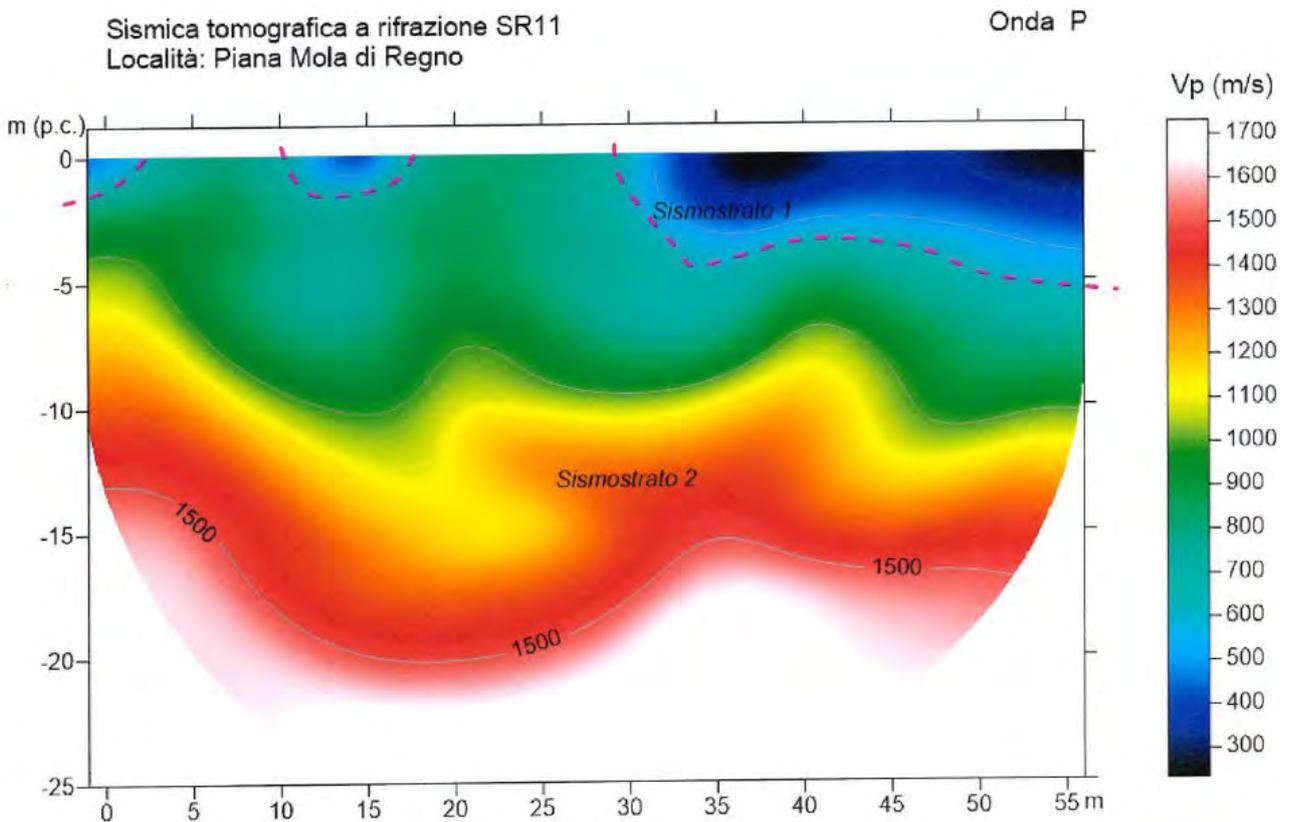
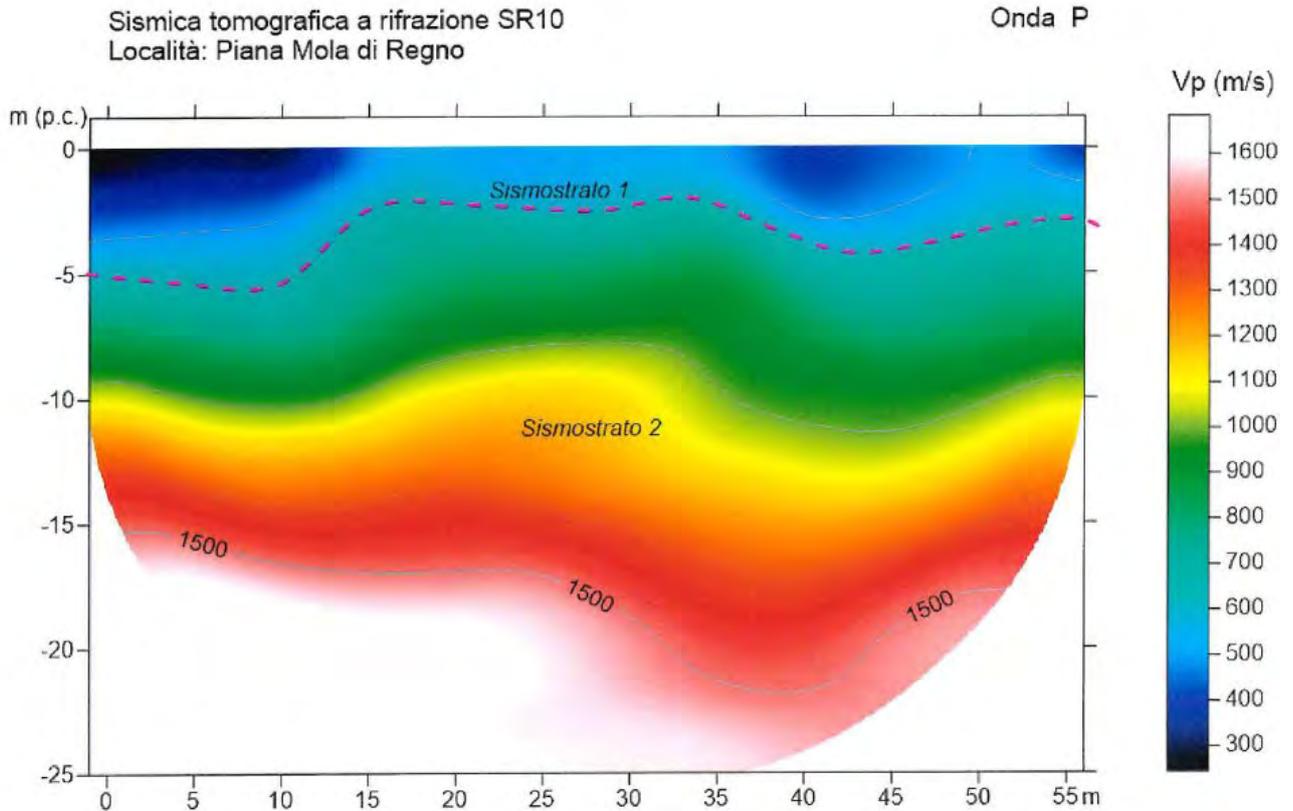


Sismica tomografica a rifrazione SR7
Località: Piana Mola di Regno

Onda P

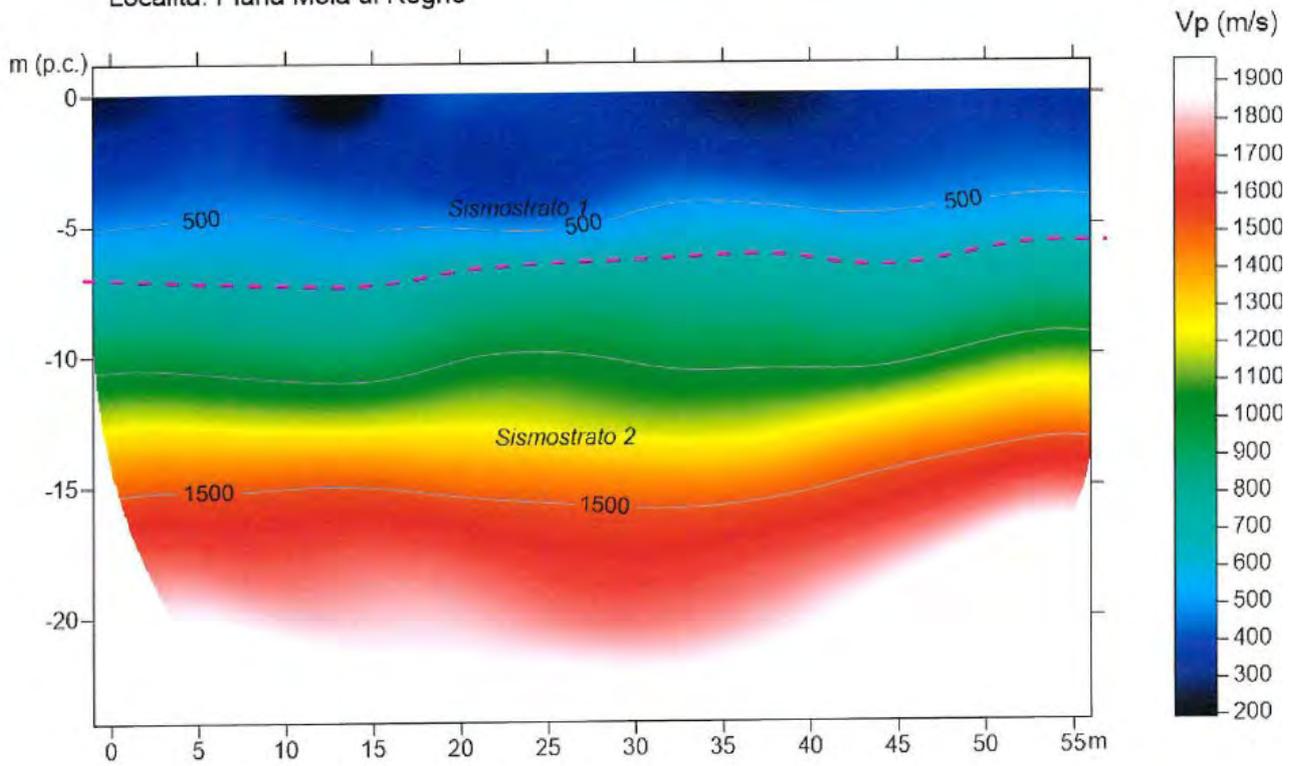






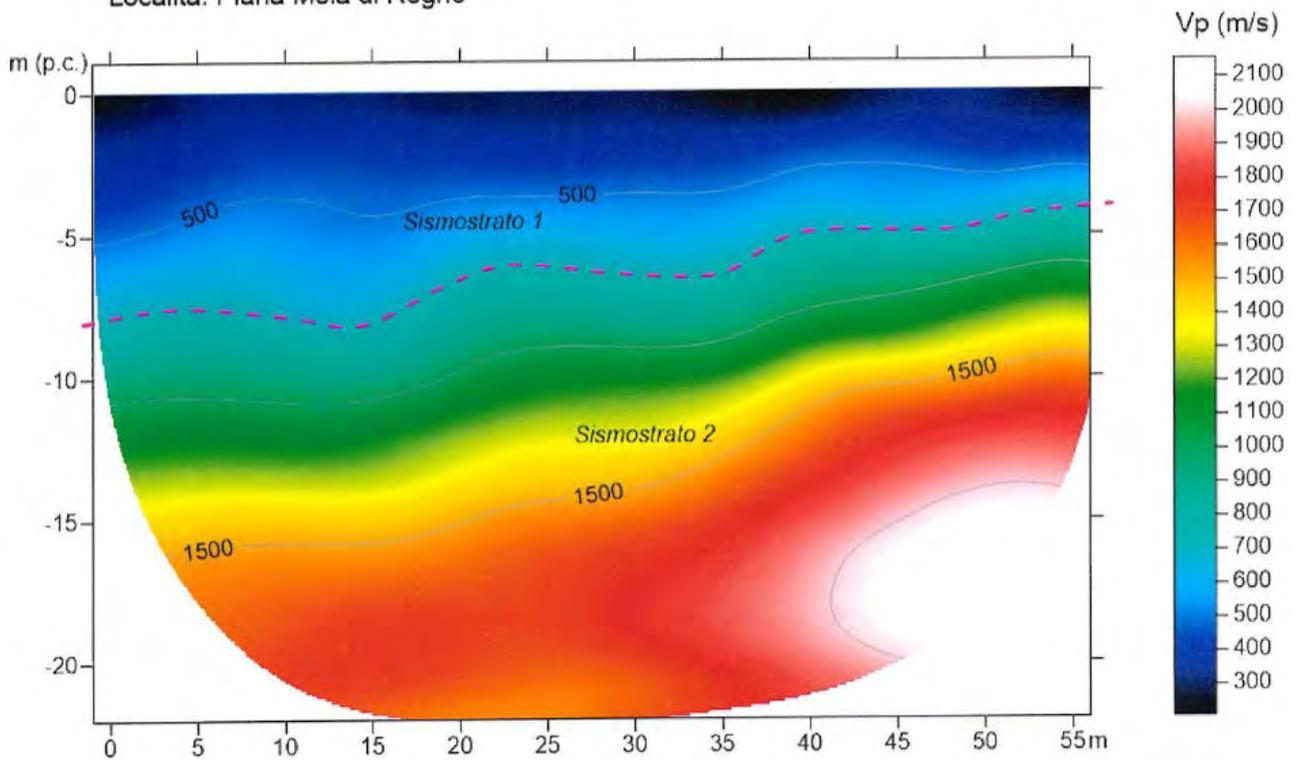
Sismica tomografica a rifrazione SR12
Località: Piana Mola di Regno

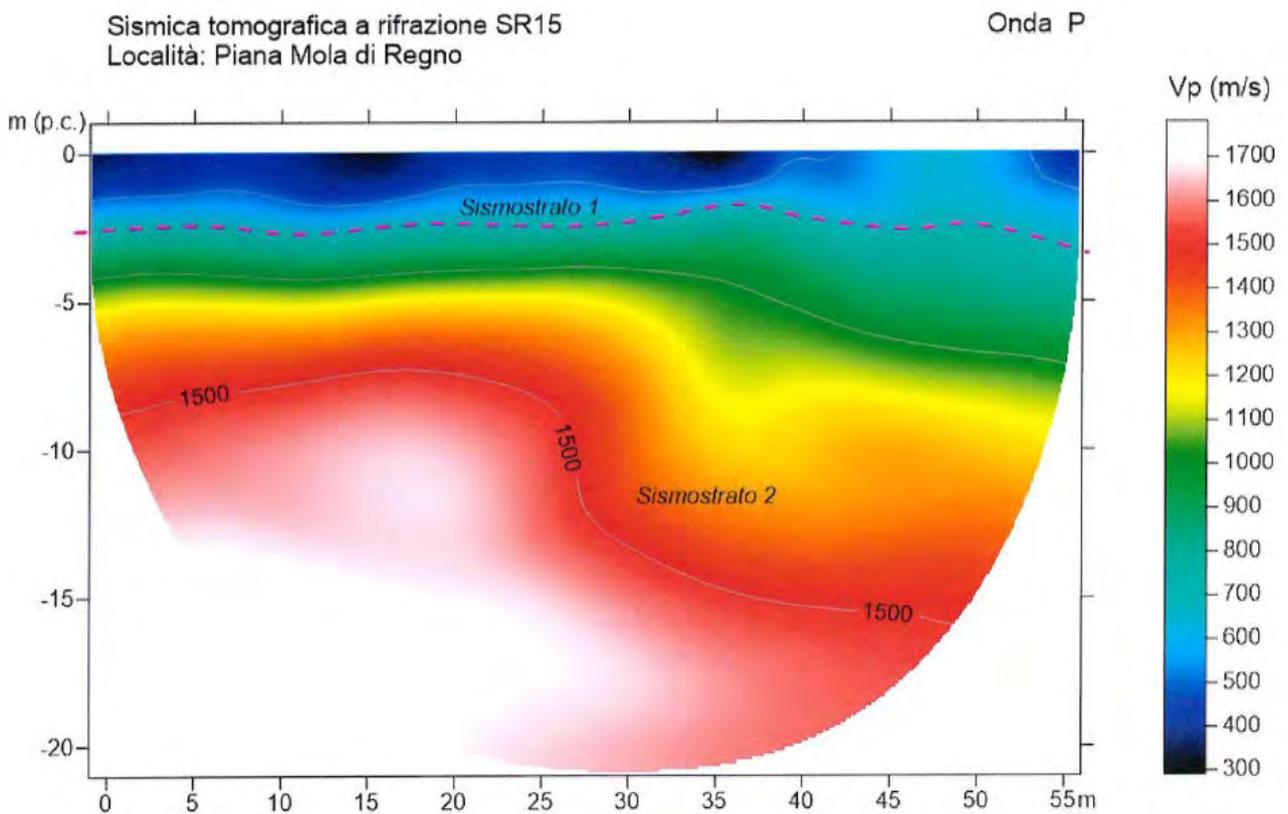
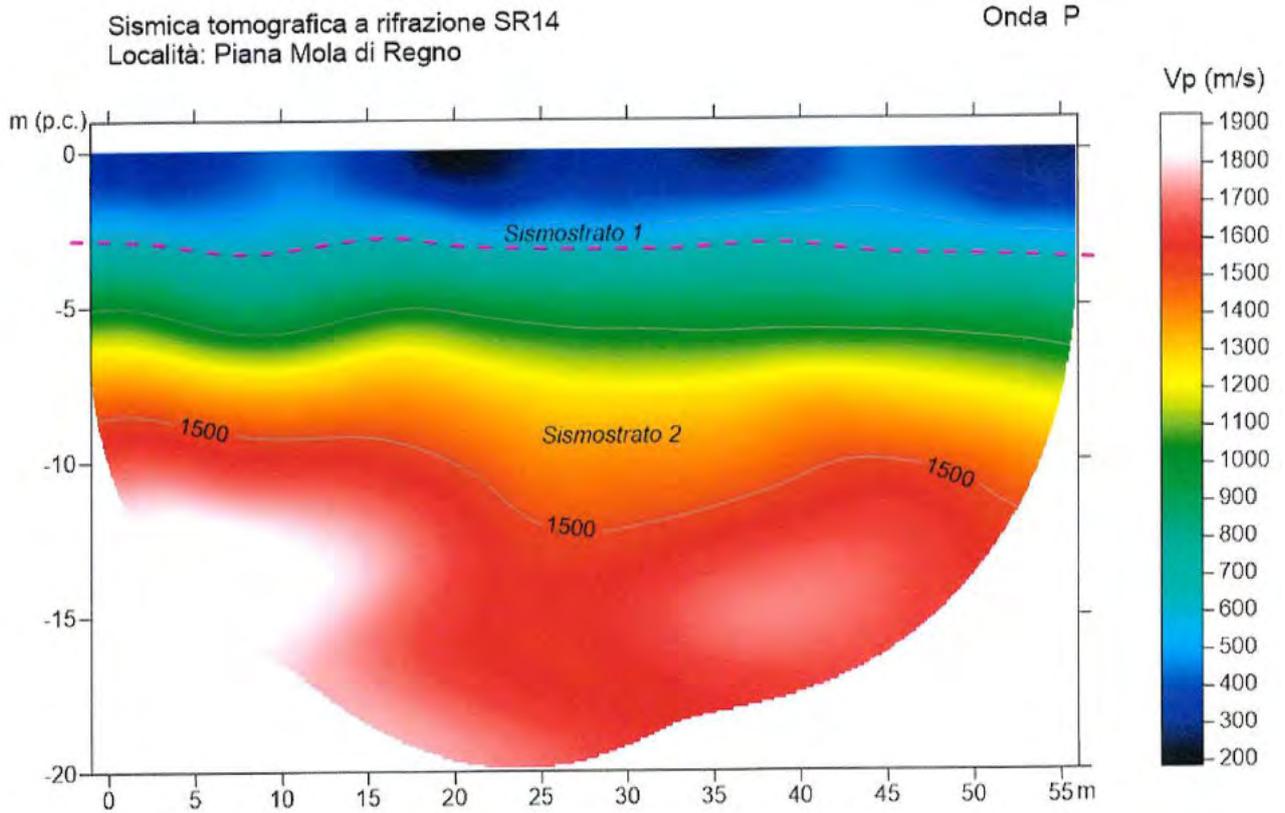
Onda P

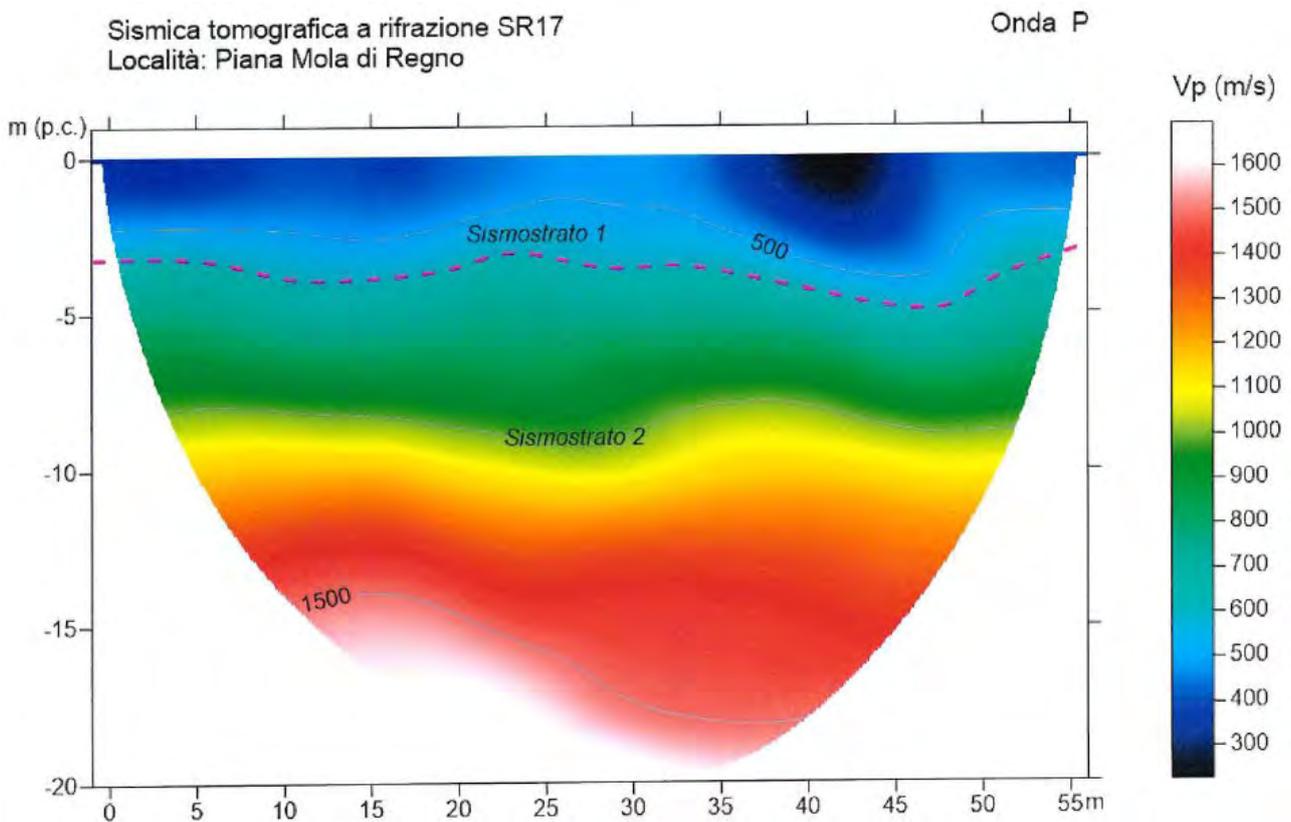
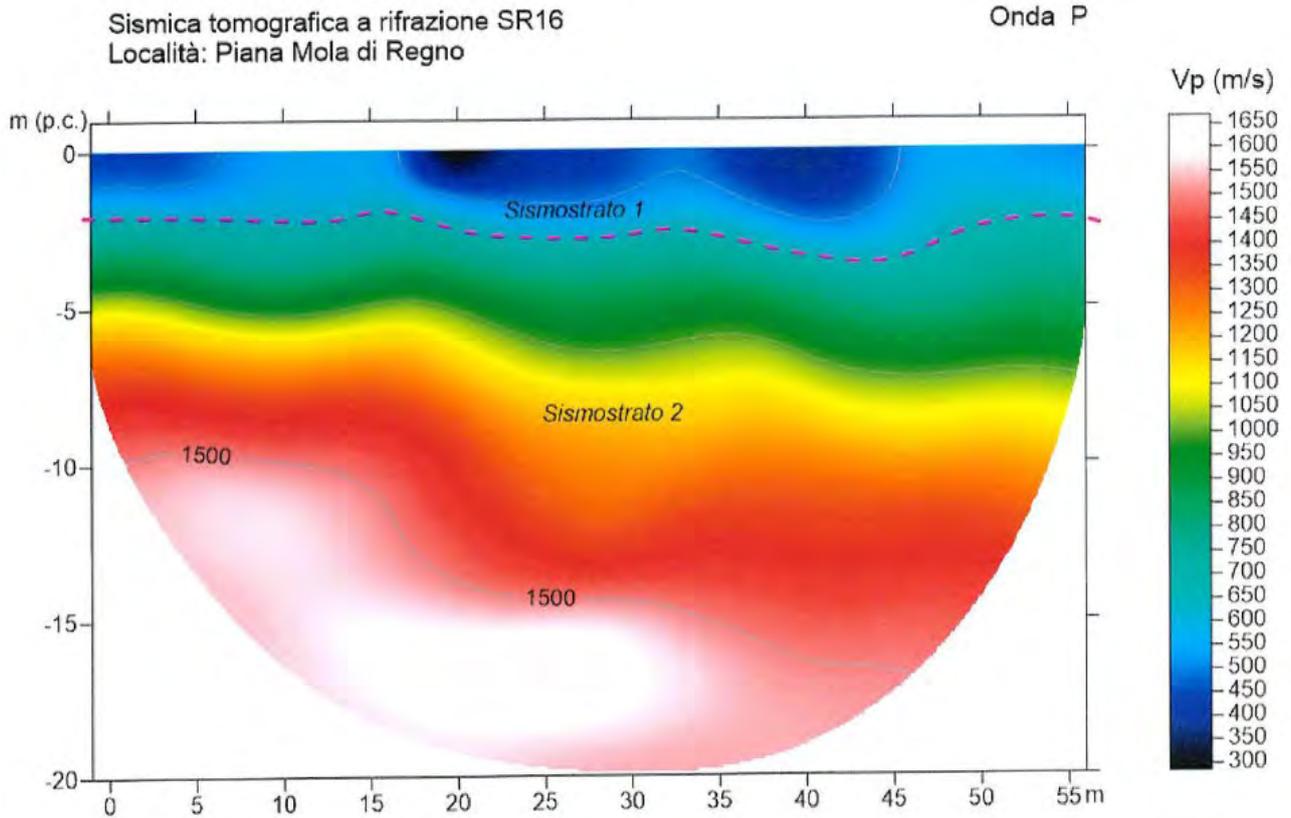


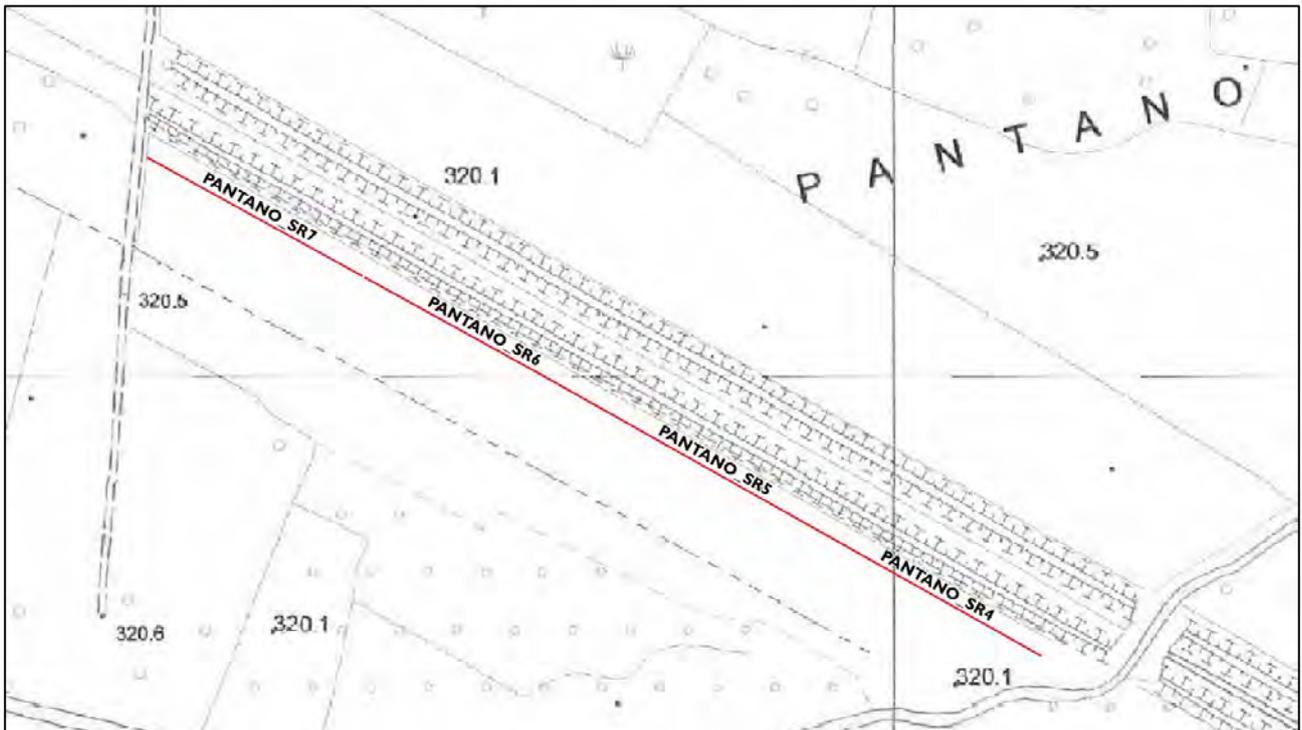
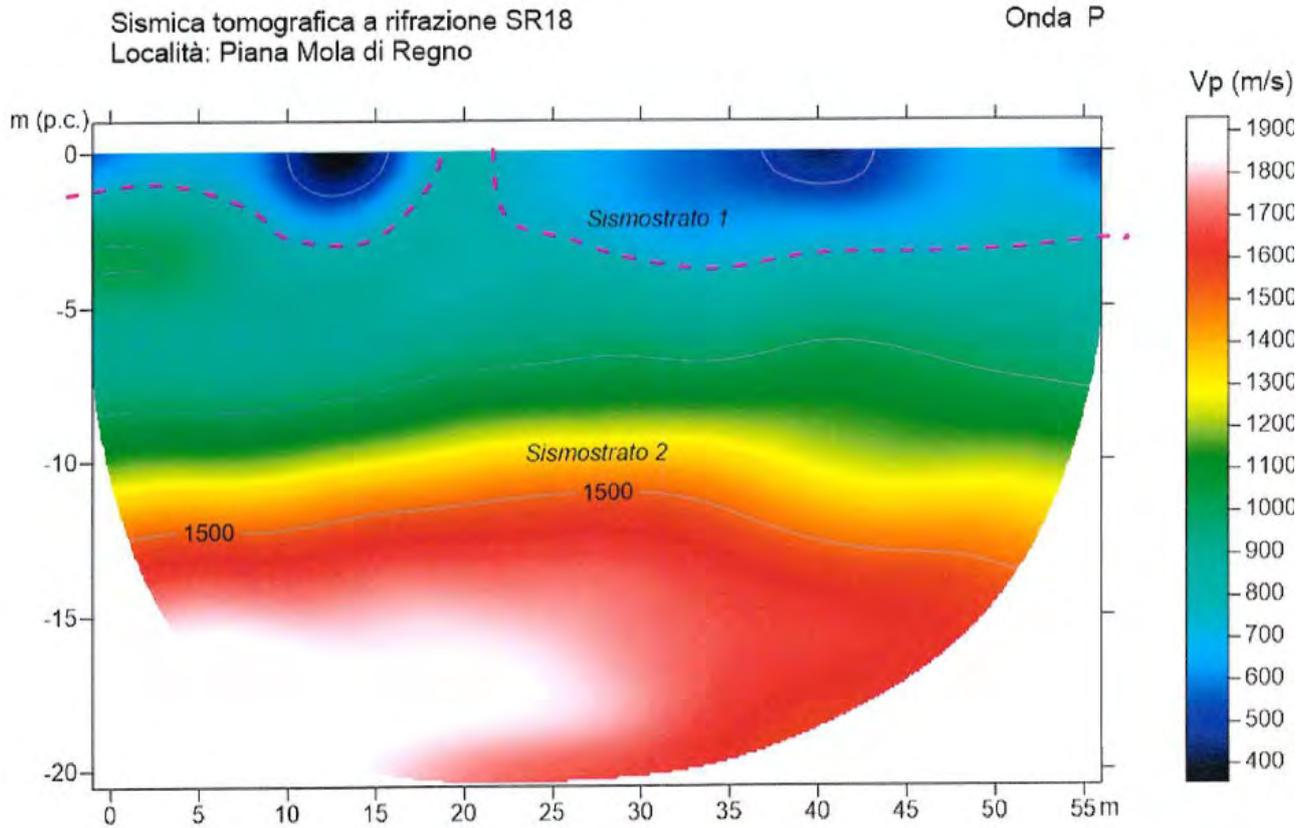
Sismica tomografica a rifrazione SR13
Località: Piana Mola di Regno

Onda P



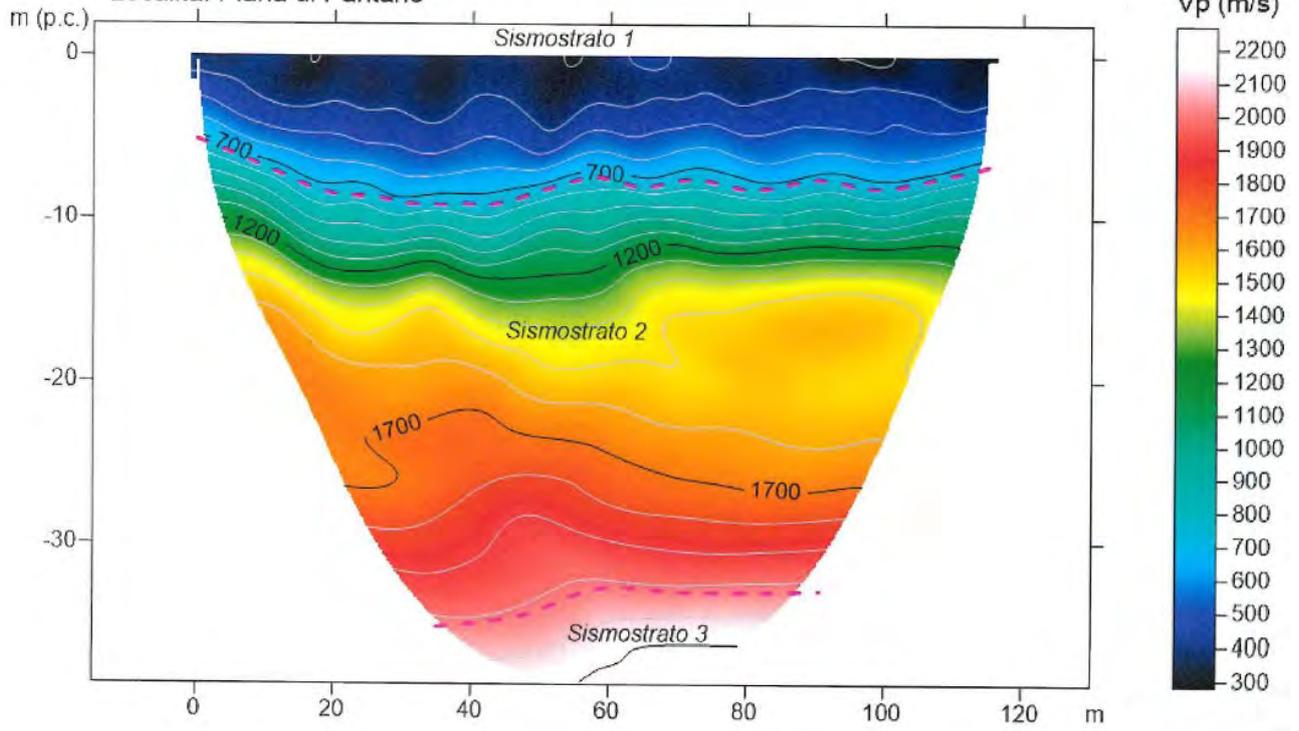






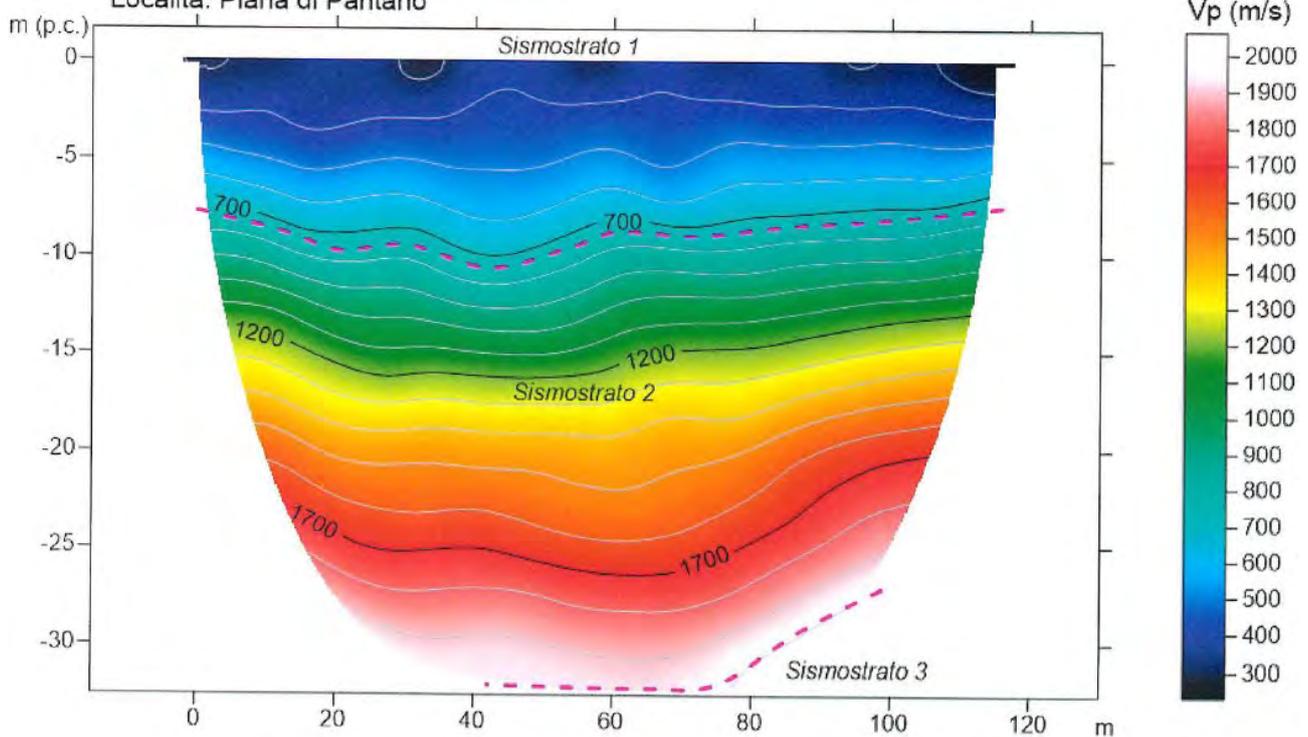
Sismica tomografica a rifrazione SR4
Riferimento: Nuovo Acquedotto Marcio
Località: Piana di Pantano

Onda P



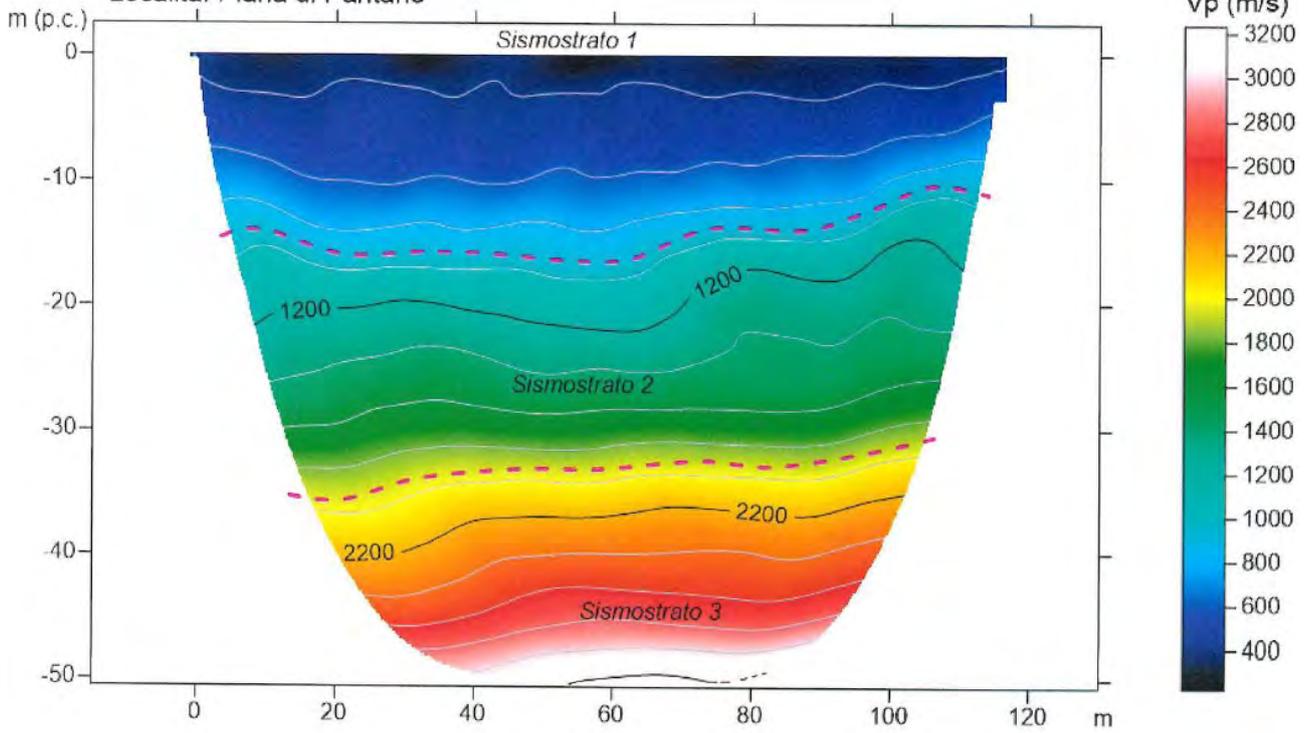
Sismica tomografica a rifrazione SR5
Riferimento: Nuovo Acquedotto Marcio
Località: Piana di Pantano

Onda P



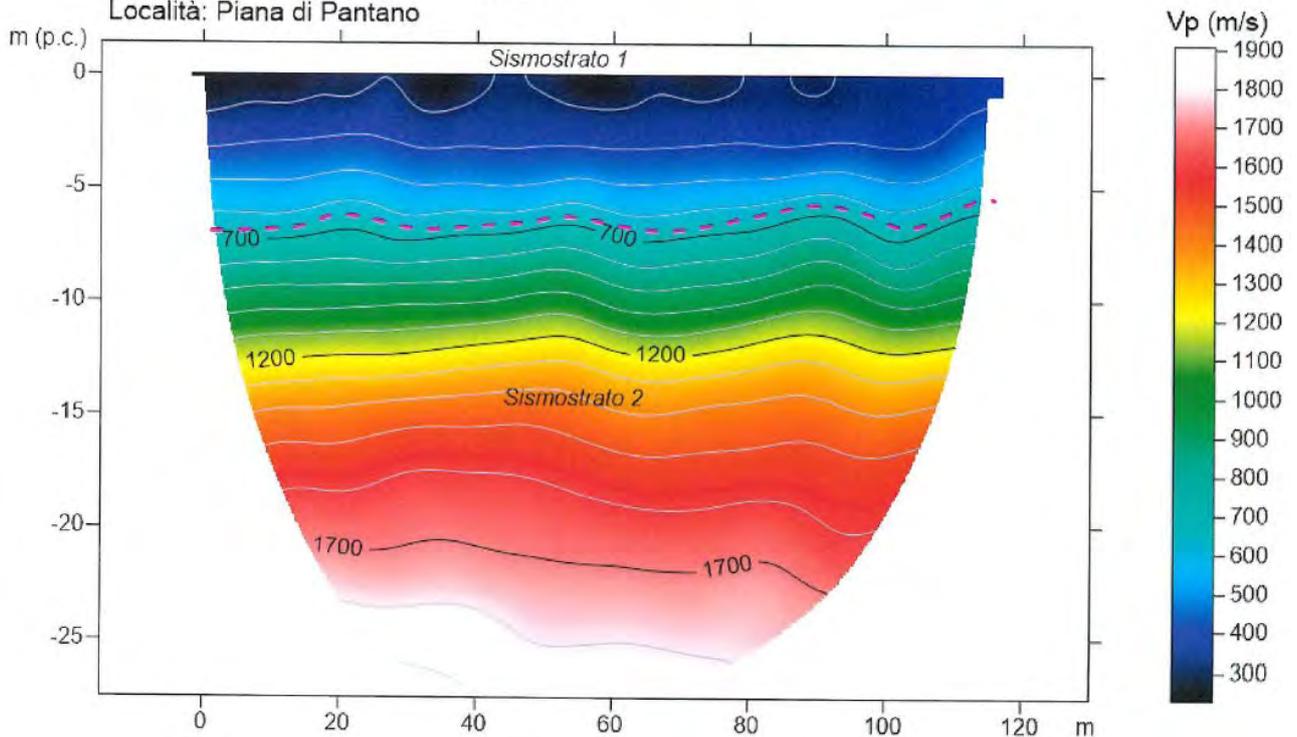
Sismica tomografica a rifrazione SR6
Riferimento: Nuovo Acquedotto Marcio
Località: Piana di Pantano

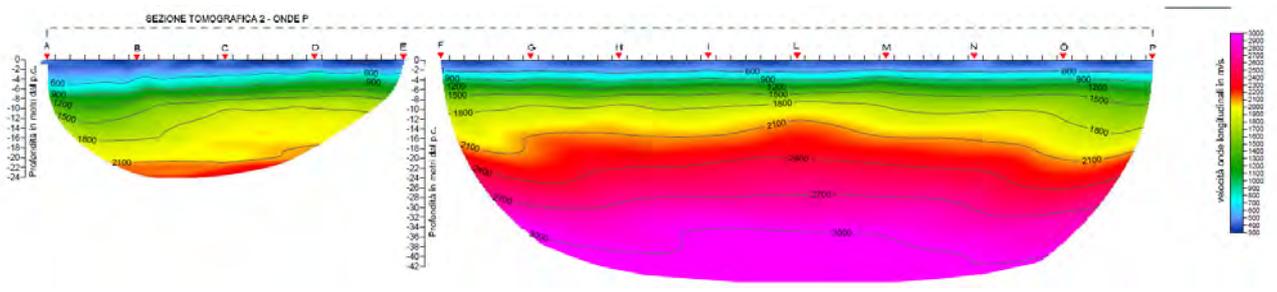
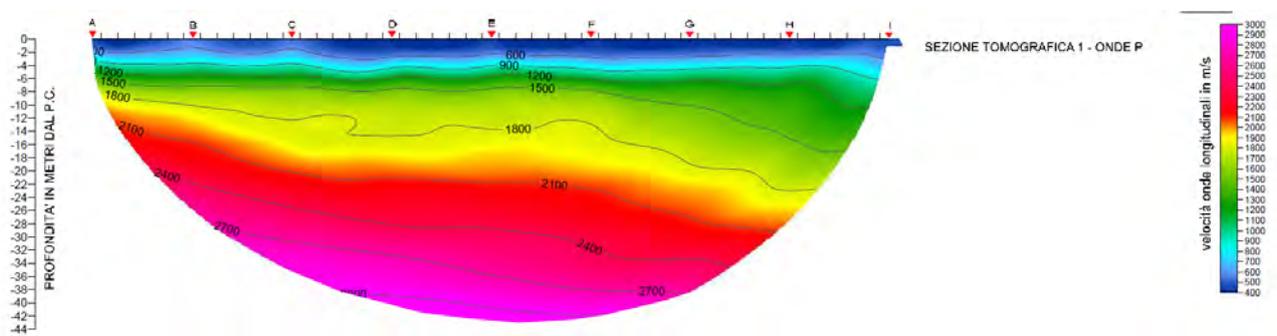
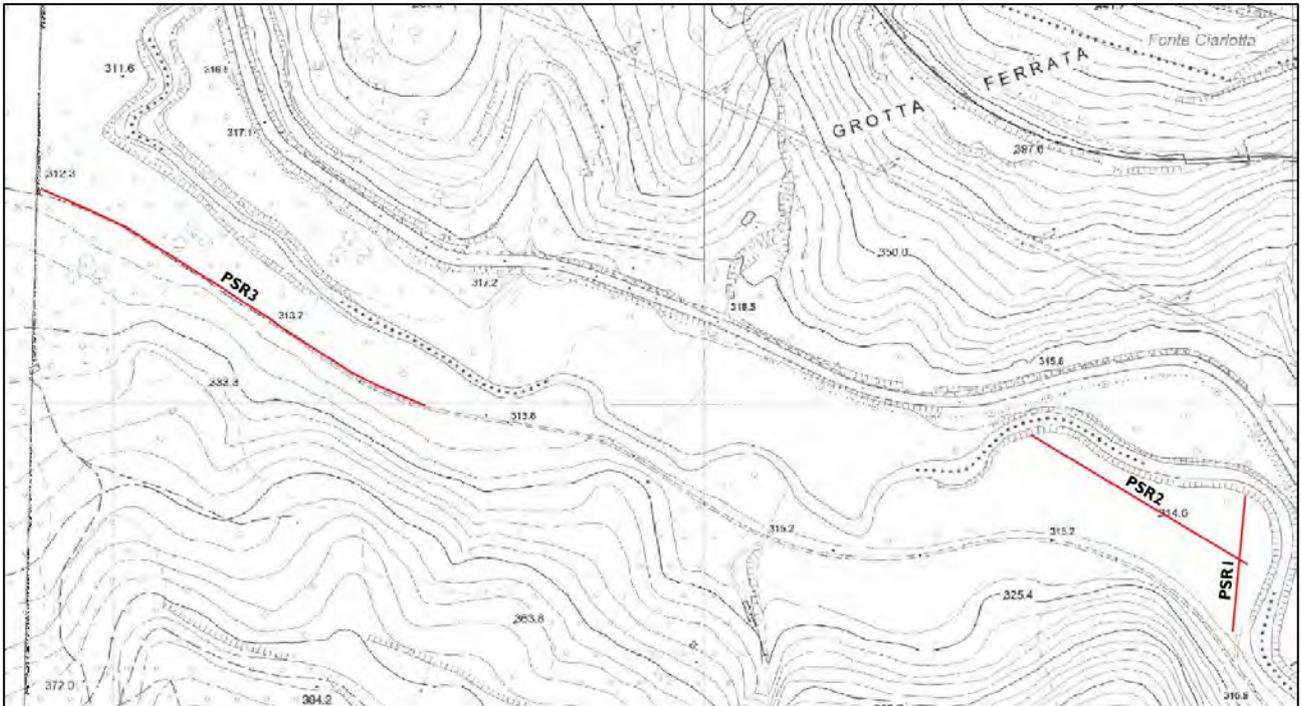
Onda P

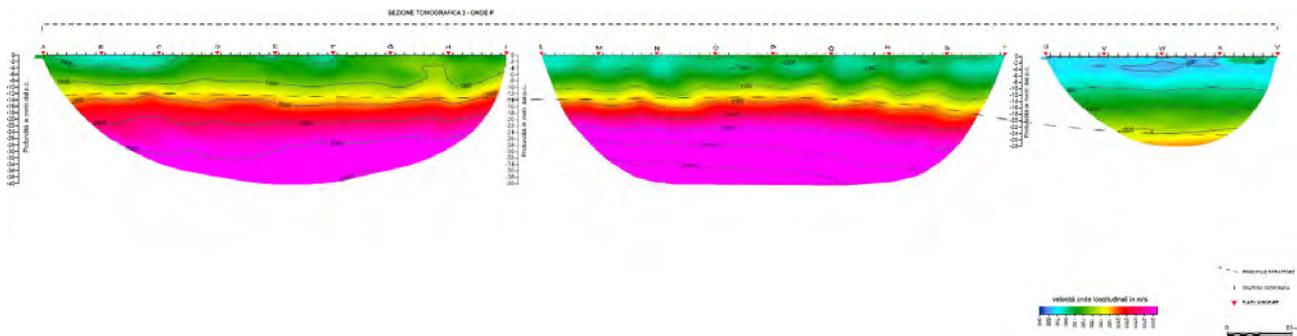


Sismica tomografica a rifrazione SR7
Riferimento: Nuovo Acquedotto Marcio
Località: Piana di Pantano

Onda P







7.4.4 Prospezioni sismiche a riflessione

La sismica a riflessione è una metodologia largamente utilizzata nell'esplorazione del sottosuolo per riconoscere l'assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici. Essa permette di effettuare una ricostruzione, talvolta molto precisa, delle porzioni sepolte della superficie terrestre e può essere applicata in vari ambienti. La sismica a riflessione è un metodo di prospezione di tipo attivo che consiste nel generare onde sismiche nel sottosuolo e misurare i tempi di arrivo delle onde riflesse dagli strati posti a diverse profondità. Questo tempo viene definito come Two-way Travel Time (TWTT) poiché si considerano insieme tempo di andata e tempo di ritorno.

La strumentazione è costituita da:

- sorgente (che può essere una massa battente o una carica esplosiva)
- uno stendimento di ricevitori (geofoni)
- un sismografo multicanale per l'acquisizione e registrazione dei dati

I dati vengono elaborati per risalire alla profondità delle diverse superfici incontrate e stabilire la geometria, le reciproche relazioni e le caratteristiche sismiche dei corpi attraversati. Si ottengono quindi profili sismici e ricostruzioni grafiche 2D che descrivono le geometrie e gli spessori delle varie strutture geologiche, caratterizzate da reciproca variabilità litologica e/o composizionale.

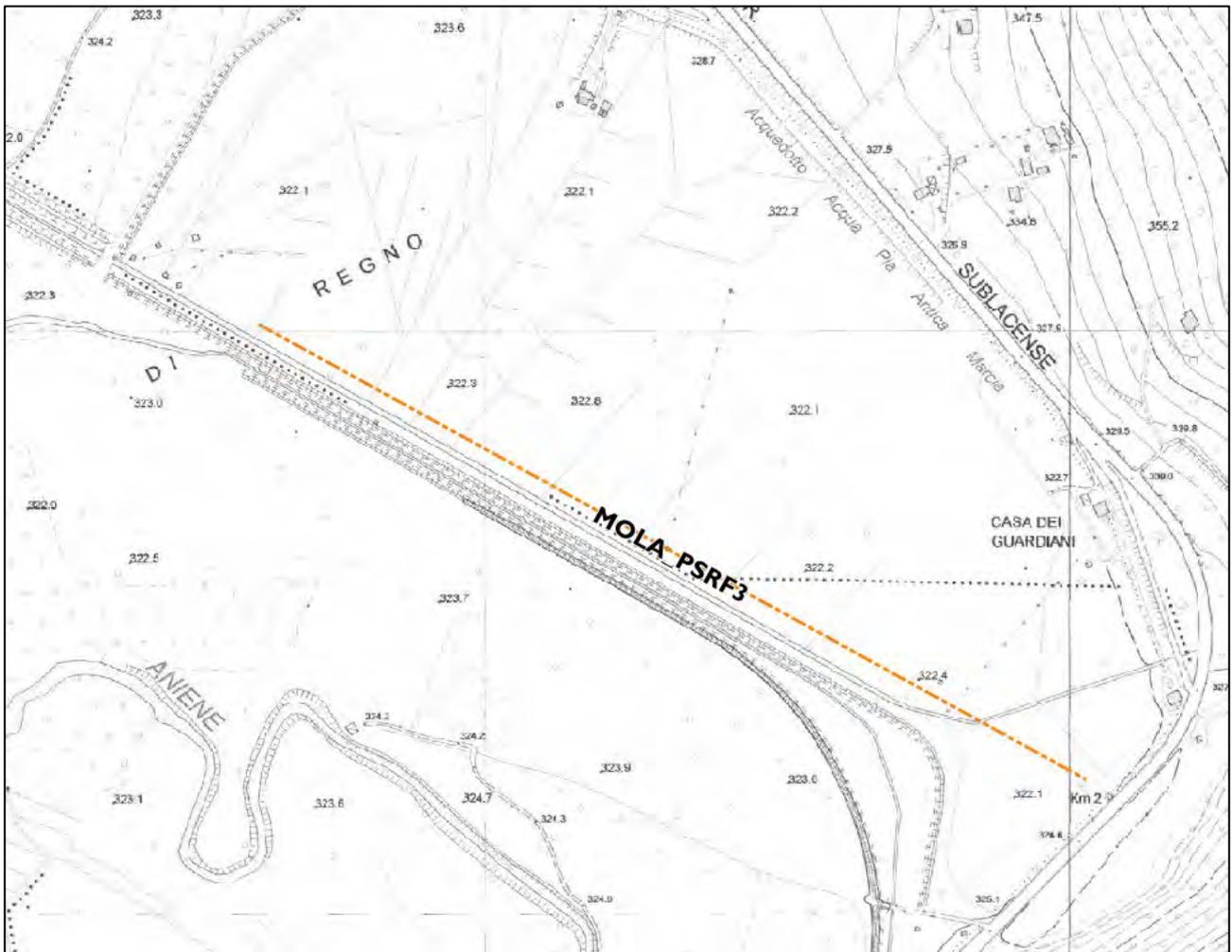
Per maggiori dettagli sulle caratteristiche della strumentazione e delle modalità esecutive della prova e sui risultati, si rimanda alle descrizioni presenti nei report in allegato.

Le indagini di sismica a riflessione eseguite sono riportate in Tabella 7.4.4.1. Sono indicate le ubicazioni di indagine ed i risultati inerenti ai sismostrati e ai riflettori. I risultati delle indagini di sismica a riflessione sono stati utilizzati per migliorare la

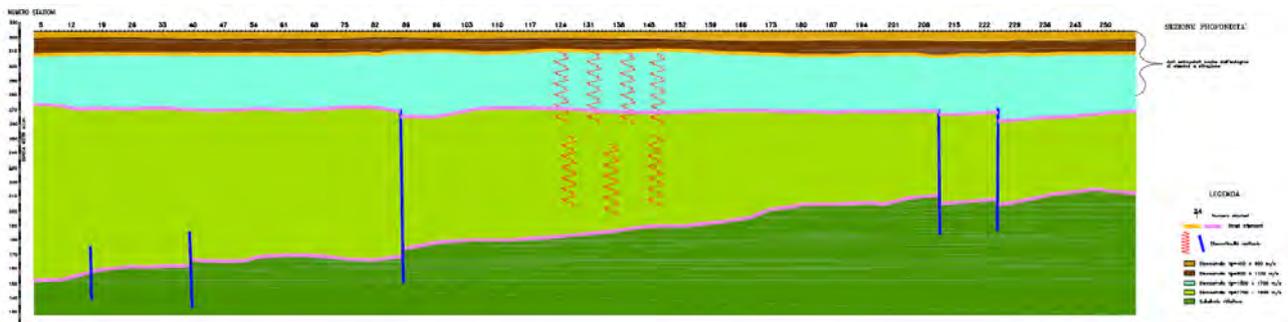
ricostruzione del modello concettuale geologico dell'area di interesse e la caratterizzazione sismica dell'area. In particolare, le restituzioni grafiche 2D di ogni stendimento sismico hanno permesso di stabilire lo spessore delle alluvioni recenti, la presenza di eventuali strutture tettoniche nel bedrock meso-cenozoico, qualora intercettato, e di definire la stima media delle velocità sismiche V_s e V_p che caratterizzano i corpi geologici attraversati. È possibile talora, dalle sezioni sismiche, desumere indicazioni sulla morfologia della valle sepolta in corrispondenza dell'attuale valle alluvionale del fiume Aniene. Tuttavia, essendo questa antica morfologia molto articolata, si ritengono le prospezioni utili per la caratterizzazione sito specifica, e difficilmente estrapolabili in zone distanti.

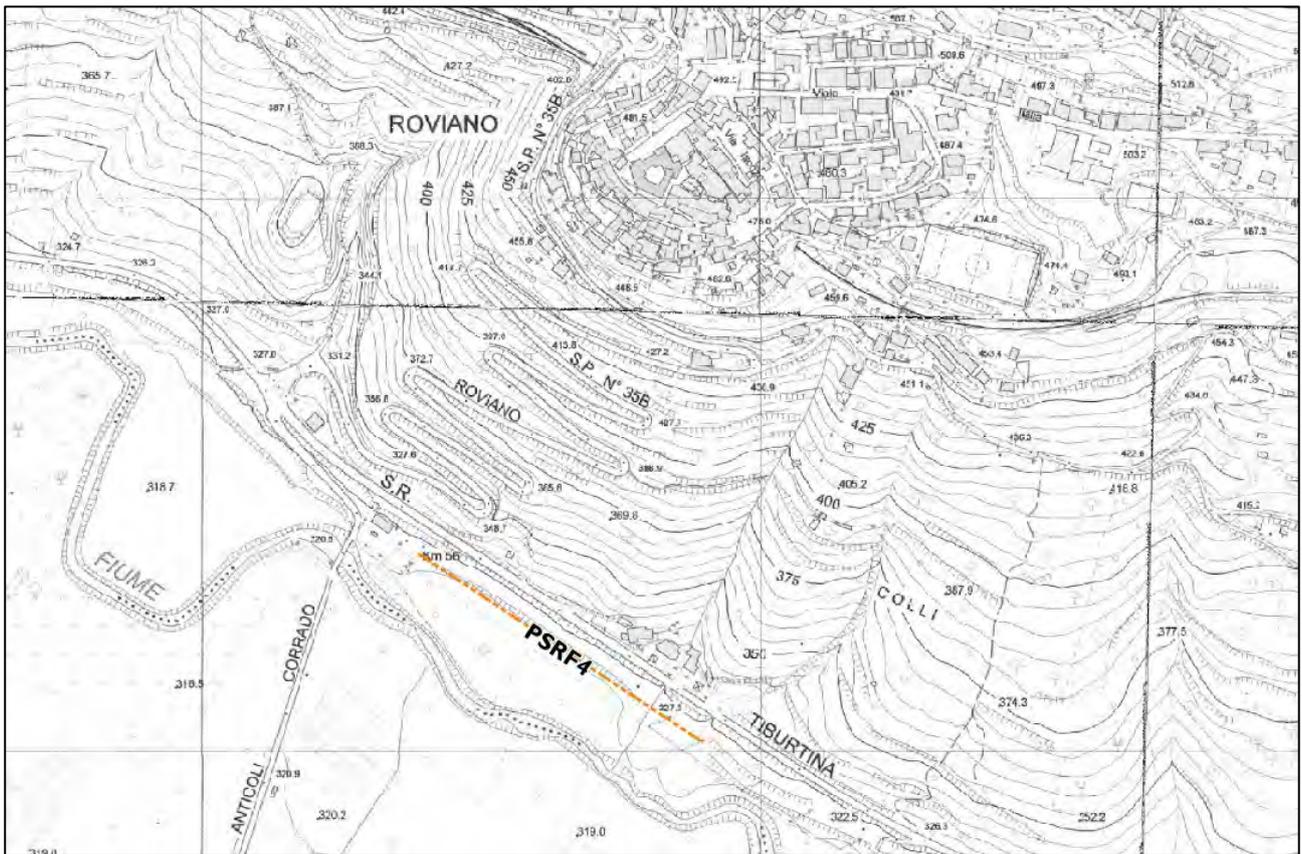
Tabella 7.4.4.1: Risultati della sismica a riflessione

Codice Indagine	Località	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Risultati indagine
da PSRF1 a PSRF3	Mola di Regno	42° 00' 42.18"	13° 01' 26.99"	Sismostrato 1: $V_p= 400-600$ m/s Sismostrato 2: $V_p= 900-1100$ m/s Sismostrato 3: $V_p= 1500-1700$ m/s
PSRF4	Roviano - Ponte Anticoli	42° 01' 20.06"	12° 59' 26.42"	Riflettore 1 a 13m (20 x10-3 s) Riflettore 2 a 30m (40-50 x10-3 s) Riflettore 3 a 100m (100-130 x10-3 s)
PSRF 3	Roviano - Vecchia ferrovia Lato Ovest	42°02' 01.71"	12° 57' 36.65"	Riflettore 1 tra 12m e 32m (30-70 x10-3 s) Riflettore 2 tra 100m e 115m (100-190 x10-3 s)
PSRF 2	Roviano - Vecchia ferrovia Lato Est	42° 01' 55.90"	12° 58' 07.50"	Riflettore 1 a 18m (30-40 x10-3 s) Riflettore 2 tra 80 m e 90 m (100-130 x10-3 s) Riflettore 3 a 126m (180-190 x10-3 s)
PSRF 1	Roviano - Vecchia ferrovia Lato Est	42° 01' 55.90"	12° 58' 07.50"	Riflettore 1 tra 11m e 20m (90-120 x10-3 s) Riflettore 2 a 80m (30-40 x10-3 s) Riflettore 3 a 130m (160-180 x10-3 s)

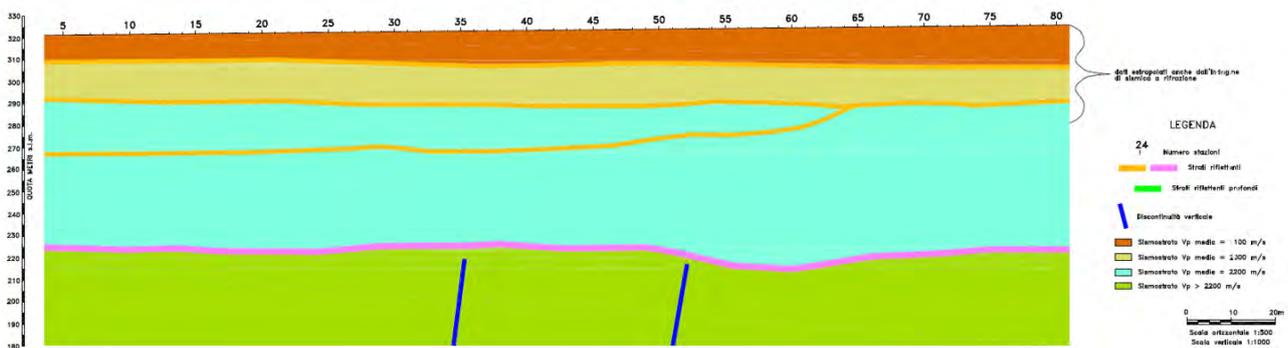


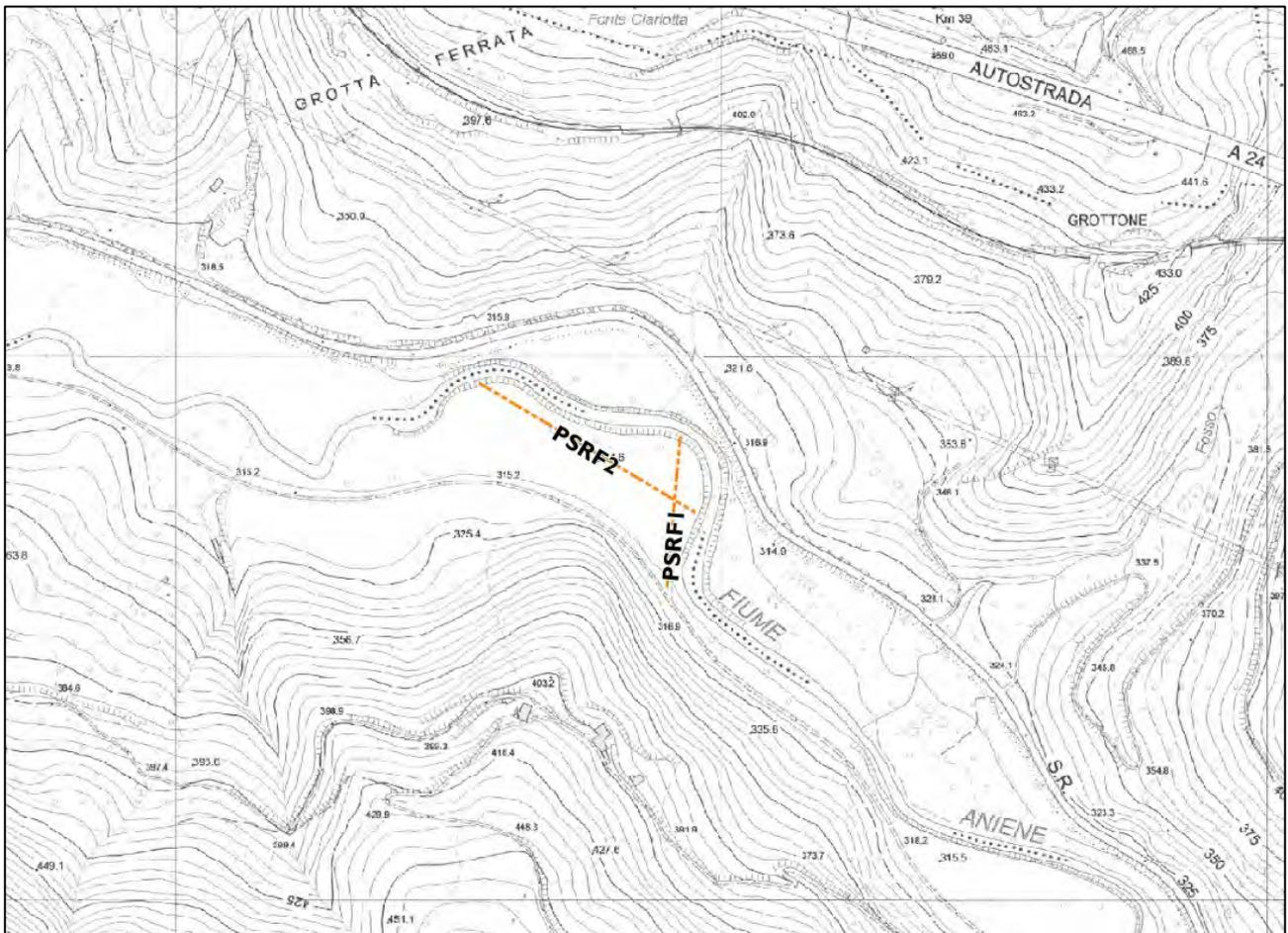
MOLA_PSRF3



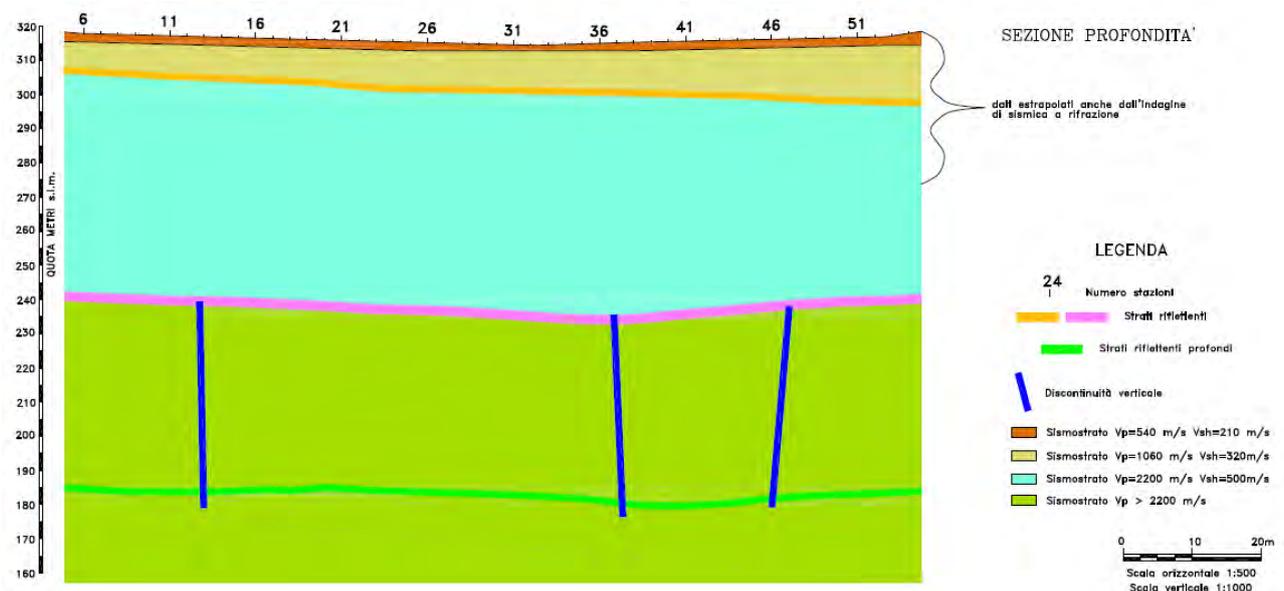


PSRF4

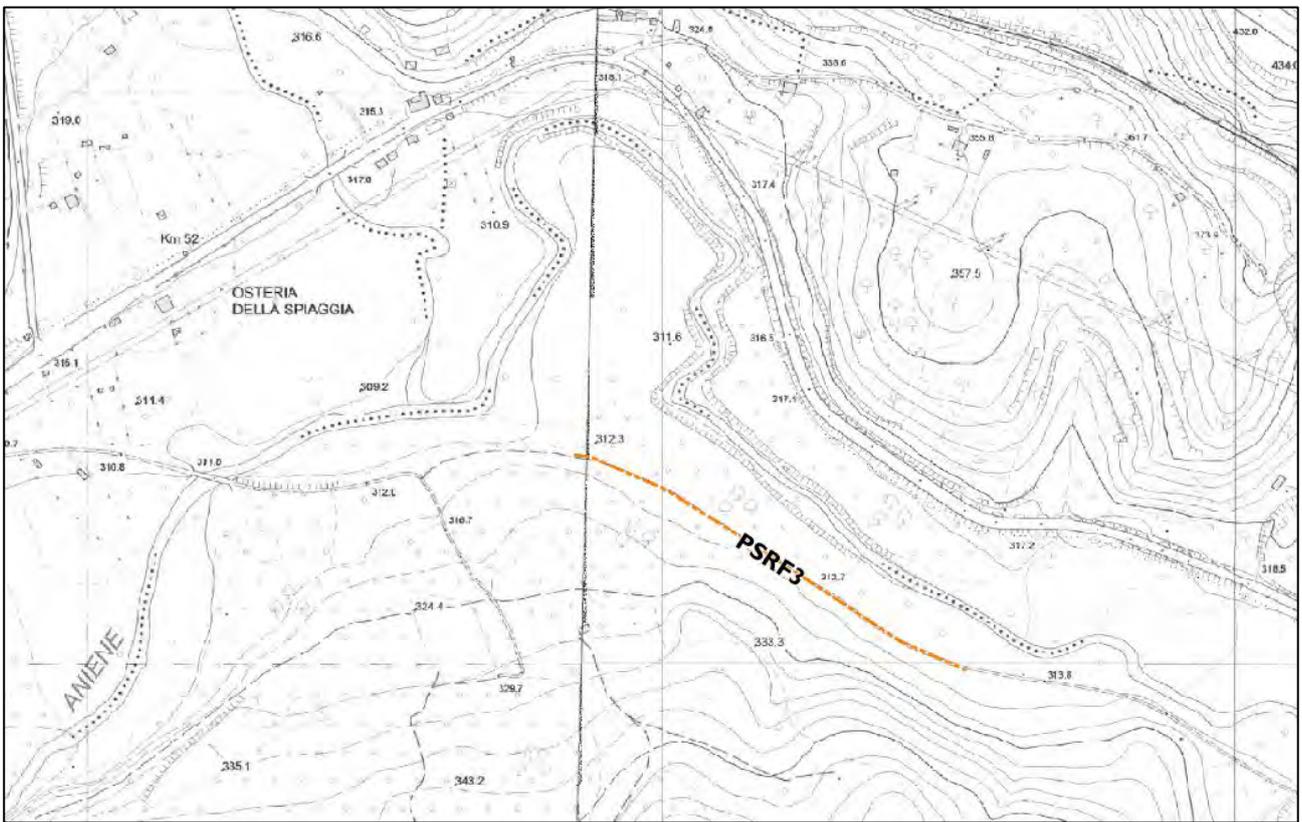
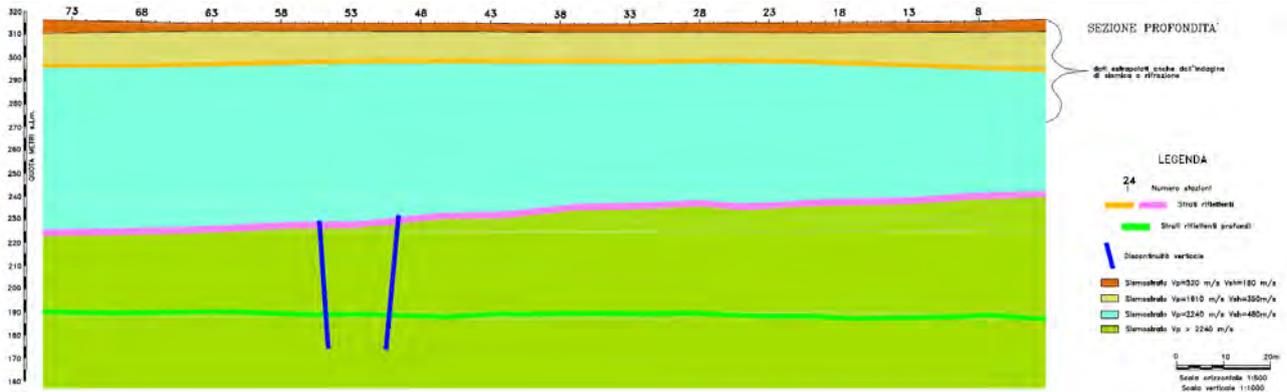




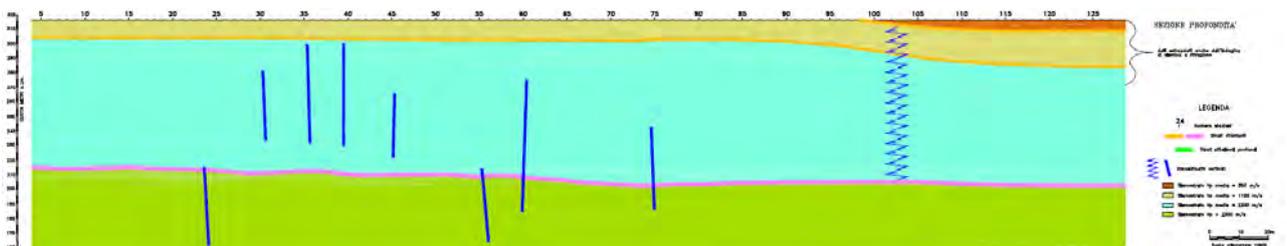
PSRF1



PSRF2



PSRF3



7.4.5 Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

Il sistema MASW è una tecnica di indagine non invasiva che consente la definizione del profilo di velocità delle onde Vs nel sottosuolo, basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori posti sulla superficie topografica. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che si trasmettono con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, in cui la velocità di fase (o di gruppo) dipende dalla frequenza di propagazione. Tramite le MASW è possibile determinare il profilo di velocità delle onde di taglio Vs, e quindi della Categoria di sottosuolo (A, B, C, D, E, come da NTC2018).

La velocità delle onde S viene stimata su un modello di strati del terreno che viene implementato con un processo iterativo fino a trovare la combinazione finale di velocità delle onde di taglio e spessori degli strati, tale da minimizzare gli scarti fra la curva di dispersione calcolata sul modello e quella misurata sullo spettro della dispersione delle onde superficiali. Essendo questo tipo di elaborazione un procedimento inverso, esso risente di tutti i problemi e delle limitazioni dovute alla convergenza dei metodi iterativi ed alla non unicità delle soluzioni.

Lo strumento è composto da una sorgente artificiale di onde sismiche, da un numero di geofoni stabilito in base alle esigenze e da un dispositivo per la registrazione dei dati

Le NTC 2018 attuano la classificazione del sottosuolo (A, B, C, D, E) in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio Vs,eq definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

- h_i = spessore dell'i-esimo strato
- $V_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato
- N = numero di strati
- H = profondità del substrato, avente $V_s > 800$ m/s

Per maggiori dettagli sulle caratteristiche della strumentazione e delle modalità esecutive della prova, così come sui grafici e sui dati di dettaglio, si rimanda alle descrizioni presenti nei report in allegato.

In Tabella 7.4.5.1 si riporta l'ubicazione (consultabile con maggior dettaglio negli allegati) e i risultati delle indagini MASW effettuate, in termini di V_s , eq e categoria di suolo. I risultati delle indagini MASW sono stati utilizzati per migliorare la ricostruzione del modello concettuale geologico dell'area di interesse caratterizzazione sismica dell'area.

Tabella 7.4.5.1: Risultati delle prove MASW

Codice Indagine Geofisica	Località	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Risultati indagine	Profondità investigata da pc (m)	Categoria di sottosuolo
S3 m3.1	Roviano - Anticoli	42° 01' 20.06"	12° 59' 26.42"	$V_{s,eq} = 200.98$ m/s	0 - 44	C
S3 m3.2	Roviano - Anticoli	42° 01' 20.06"	12° 59' 26.42"	$V_{s,eq} = 186.10$ m/s	0 - 44	C
S4 m4.1	SS 5 - Roviano	42° 01' 25.72"	12° 58' 51.42"	$V_{s,eq} = 416.2$ m/s	0 - 44	B
S4 m4.2	SS 5 - Roviano	42° 01' 25.72"	12° 58' 51.42"	$V_{s,eq} = 401.9$ m/s	0 - 44	B
S8 m8.1	SS 5 - Roviano	42° 01' 55.32"	12° 58' 11.55"	$V_{s,eq} = 354.28$ m/s	0 - 44	C
S8 m8.2	SS 5 - Roviano	42° 01' 55.32"	12° 58' 11.55"	$V_{s,eq} = 235.05$ m/s	0 - 44	C
S13 m13.1	Roviano	42° 02' 05.04"	12° 57' 20.68"	$V_{s,eq} = 385.93$ m/s	0 - 44	B
S13 m13.2	Roviano	42° 02' 05.04"	12° 57' 20.68"	$V_{s,eq} = 399.56$ m/s	0 - 44	B
m1_Mol11	Mola di Regno	42° 00' 36.33"	13° 01' 21.20"	$V_{s,eq} = 159$ m/s	0 - 30	D
m2_Mol11	Mola di Regno	42° 00' 36.33"	13° 01' 21.20"	$V_{s,eq} = 159$ m/s	0 - 30	D
m1_Mol13	Mola di Regno	42° 00' 38.97"	13° 01' 23.34"	$V_{s,eq} = 155$ m/s	0 - 30	D
m2_Mol13	Mola di Regno	42° 00' 38.97"	13° 01' 23.34"	$V_{s,eq} = 146$ m/s	0 - 30	D
m1_Mol15	Mola di Regno	42° 00' 42.18"	13° 01' 26.99"	$V_{s,eq} = 179$ m/s	0 - 30	D
m2_Mol15	Mola di Regno	42° 00' 42.18"	13° 01' 26.99"	$V_{s,eq} = 200$ m/s	0 - 30	C

7.4.6 Misure di frequenza fondamentale con metodo HVSR

La metodologia HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, o nota anche come tecnica di Nakamura) si svolge partendo da registrazioni di rumore sismico ambientale per ottenere gli spettri delle componenti orizzontali (N-S; E-O) e verticali (up-down), rapportandole tra loro e ottenendo i picchi di rapporto spettrale. Le misure devono essere effettuate attraverso velocimetri e tromometri perché sono strumenti con alta sensibilità e riescono a misurare le deboli vibrazioni del rumore sismico ambientale. La tecnica dei rapporti spettrali H/V consiste nel calcolo del rapporto degli spettri di Fourier del rumore della componente orizzontale H, calcolato come media degli spettri delle componenti orizzontali NS ed EW, su quella verticale V registrate entrambe in una singola stazione di misura.

Attraverso tale prova, quindi, è possibile determinare:

- la frequenza fondamentale di risonanza del terreno
- l'individuazione della profondità del bedrock sismico

La frequenza fondamentale di risonanza è descritta dalla seguente relazione:

$$f = \frac{V_s}{4h}$$

- V_s = è la velocità delle onde di taglio nello strato che risuona
- h = è lo spessore dello strato che risuona

Per maggiori dettagli sulle caratteristiche della strumentazione e delle modalità esecutive della prova, così come sui grafici e sui dati di dettaglio, si rimanda alle descrizioni presenti nei report in allegato.

I risultati delle analisi HVSR, in termini di frequenza fondamentale di risonanza (Hz) del picco del rapporto H/V con un errore inferiore all'unità, sono riportati in Tabella 7.4.6.1.

I risultati delle indagini HVSR sono stati utilizzati per migliorare la ricostruzione del modello concettuale geologico dell'area di interesse e la caratterizzazione sismica dell'area.

Tabella 7.4.6.1: Risultati delle analisi HVSR.

Codice Indagine Geofisica	Località	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Risultati indagine
S3 h3	Roviano - Anticoli	42° 01' 20.06"	12° 59' 26.42"	Frequenza del picco del rapporto H/V: 2.90 Hz ± 0.18 Hz
S4 h4	SS 5 - Roviano	42° 01' 25.72"	12° 58' 51.42"	Frequenza del picco del rapporto H/V: 0.50 Hz ± 0.29 Hz
S6 h6	SS 5 - Roviano	42° 01' 34.75"	12° 58' 32.38"	Frequenza del picco del rapporto H/V: 5.75 Hz ± 0.25 Hz
S8 h8	SS 5 - Roviano	42° 01' 46.23"	12° 58' 20.85"	Frequenza del picco del rapporto H/V: 0.50 Hz ± 0.29 Hz
S12 h12	Roviano	42°02' 01.71"	12° 57' 36.65"	Frequenza del picco del rapporto H/V: 1.55 Hz ± 0.24 Hz
S13 h13	Roviano	42° 02' 05.04"	12° 57' 20.68"	Frequenza del picco del rapporto H/V: 3.35 Hz ± 0.64 Hz

7.4.7 Prova sismica in foro di tipo Down Hole

La prova downhole è una tecnica sismica per la determinazione delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni; in particolare permette di determinare la velocità di propagazione delle onde sismiche P ed S a diverse profondità, misurando il tempo che tali onde impiegano nel tragitto tra la sorgente (in superficie) e il ricevitore (posto all'interno di un foro di sondaggio opportunamente predisposto), e di ricavare i parametri dei terreni attraversati.

Le componenti indispensabili per una misura accurata consistono:

- una sorgente meccanica in grado di generare onde elastiche.
- uno o più geofoni tridimensionali dotati di un sistema di ancoraggio alle pareti del foro;
- un sismografo multicanale, in grado di registrare le forme d'onda in modo digitale e di registrarle su un dispositivo;

- un trasduttore (trigger) alloggiato nella sorgente necessario per l'identificazione dell'istante di partenza della sollecitazione dinamica effettuata mediante massa battente.

La prova è impiegata per la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo al fine di ottenere una ricostruzione sismo-stratigrafica del terreno.

Per maggiori dettagli sulle caratteristiche della strumentazione e delle modalità esecutive della prova, così come sui grafici e sui dati di dettaglio, si rimanda alle descrizioni presenti nei report in allegato.

I sondaggi S1, S2, S3 bis, S6, S14 bis sono stati attrezzati per eseguire la prova DH.

In Tabella 7.4.7.1 sono indicati i risultati riassuntivi delle prove downhole eseguite, con il numero di sismostrati individuati e le categorie di sottosuolo ottenute dalle Vs, eq.

Tabella 7.4.7.1 Risultati riassuntivi delle prove downhole.

Codice Sondaggio	Risultati indagine	Profondità investigata da pc (m)	Categoria di sottosuolo	N° Sismostrati
S1	Vs,eq= 375,05 m/s (H=30 m; Vs= 838,57 m/s)	0 - 30	B	6
S2	Vs,eq= 333,60 m/s (H=30 m; Vs= 628,05 m/s)	0 - 30	C	5
S3bis	Vs,eq= 368.7 m/s (H=30 m; Vs= 567.7 m/s)	0 - 65	C	3
S6	Vs,eq= 414.89 m/s (H=40 m; Vs= 494.27 m/s)	0 - 40	B	3
S7	Vs,eq= 467,95 m/s (H=58 m; Vs 603 m/s)	0 - 64	B	5
S14	Vs,eq= 447.73 m/s (H=40 m; Vs= 678.89 m/s)	0 - 40	B	4

I dati ottenuti sono stati sintetizzati in Figura 7.4.7.1: essi hanno permesso di rappresentare le informazioni inerenti la velocità delle onde di taglio Vs, sia in funzione della profondità a cui è stata effettuata la prova sia della Formazione geologica potenzialmente indagata durante la prova.

Dall'analisi eseguita è stato possibile indagare il valore di Vs medio per sismo strati afferenti alle differenti Formazioni geologiche. Dall'analisi dei dati si denota, come di norma ci si aspetterebbe, una generale proporzionalità tra l'aumento del valore di Vs e la profondità investigata. La Formazione delle alluvioni recenti e quaternarie "b" mostra

un forte aumento della V_s media con la profondità; in particolare i dati provenienti dai sismostrati più profondi intercettati in questa formazione, compatibili con litotipi principalmente argillosi, sembrerebbe dimostrare una capacità di trasmissione delle onde meccaniche compatibile con materiali sovra-consolidati.

Le Formazioni come i calcari e calcari marnosi CBZ3 e CDZ ed i calcari e marne SPT1b, riportano invece dei valori di V_s media generalmente inferiori a quanto ci si aspetterebbe per litologie caratterizzate da materiali litoidi e competenti; risulta infatti che, nonostante le caratteristiche del mezzo solido siano compatibili con proprietà geomeccaniche tali da presupporre valori di V_s maggiori, le condizioni di tettonizzazione dell'ammasso portano questi corpi a presentare stati di fratturazione elevata con conseguente perdita delle proprietà meccaniche.

7.5 Rilievo aerofotogrammetrico 3D mediante SAPR

Nel tratto iniziale TC1, Manufatto Origine e Nodo A è stato eseguito un rilievo aerofotogrammetrico 3D per mezzo SAPR, ovvero Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto, con lo scopo di restituire modelli digitali del terreno ed ortofoto georeferenziate ad altissima risoluzione.

Nel mese di febbraio 2019 è stato eseguito un rilievo aerofotogrammetrico in corrispondenza della piana di Mola di Regno – Pantano, quindi limitato alle aree di prevista progettazione del tratto iniziale comune, del Manufatto Origine e del Nodo A (Figura 7.5.1).

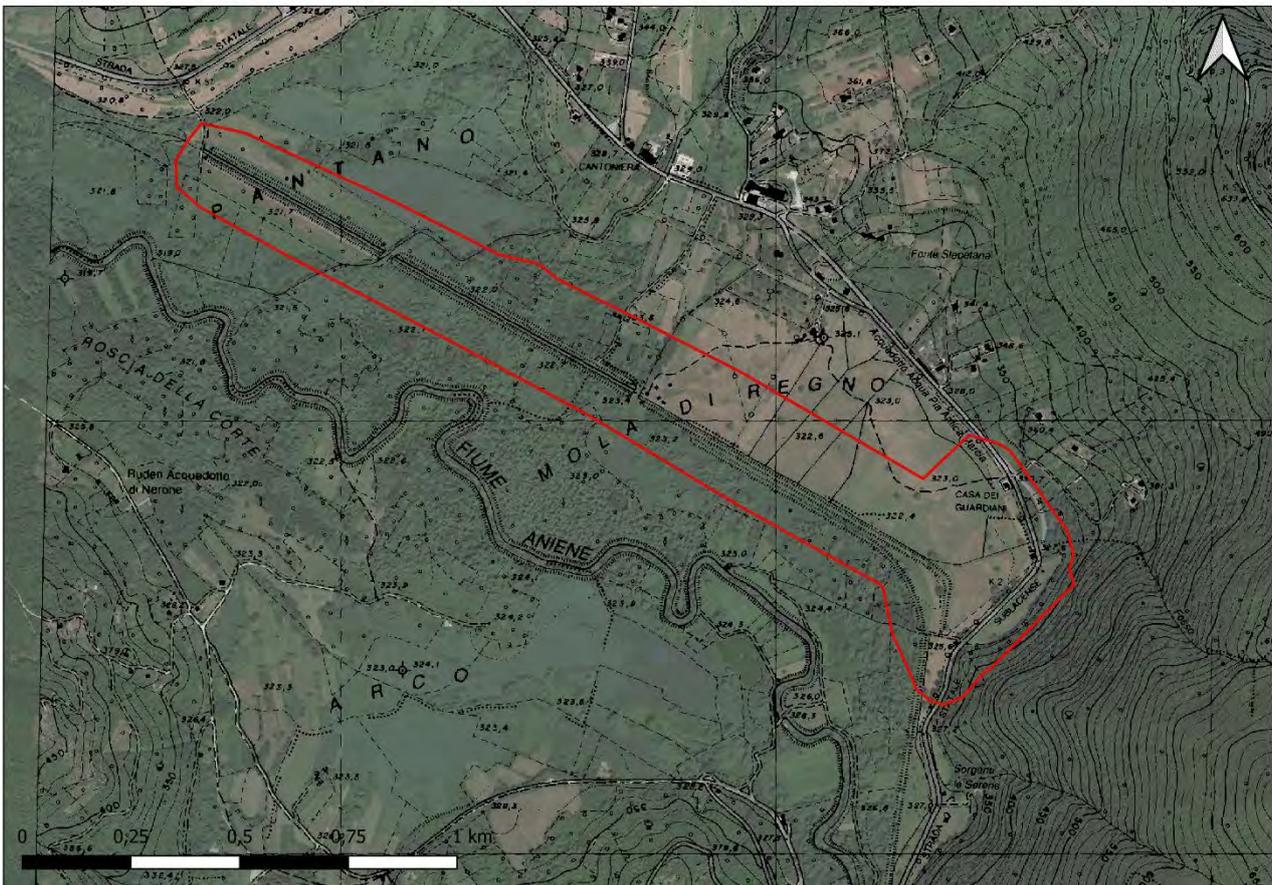


Fig. 7.5.1: Area rilevata nella piana di Mola di Regno – Pantano (evidenziata in rosso).

La fase della presa delle immagini da piattaforma SAPR si è svolta a partire dalle ore 12:00 CET.

Il rilievo da piattaforma SAPR è stato realizzato impiegando un drone multicottero DJI Phantom 4 RTK, equipaggiato a bordo con GPS, apparato IMU e una fotocamera da 20 MPx, mediante il supporto di una stazione GPS a terra (Figura 7.5.2).

La modalità di volo utilizzata per tutto il rilievo è stata quella semi-automatica, con l'ausilio del sistema satellitare integrato. La presa immagini è avvenuta seguendo una griglia costruita in fase di pianificazione prima del volo.



Fig. 7.5.2: Drone DJI Phantom 4 RTK e Stazione DJI GPS a terra impiegati nel rilievo condotto nel mese di febbraio 2019.

Modellazione tridimensionale

Le operazioni di elaborazione dati che hanno portato alla realizzazione del modello tridimensionale delle aree rilevate sono le seguenti: i) importazione fotogrammi e realizzazione *sparse point cloud*; ii) realizzazione *dense point cloud*; iii) inserimento "punti di controllo GCP" in formato XYZ; iv) allineamento modello con i punti di controllo; v) realizzazione *mesh* triangolare; vi) realizzazione *textured mesh* (Figura 7.5.5).

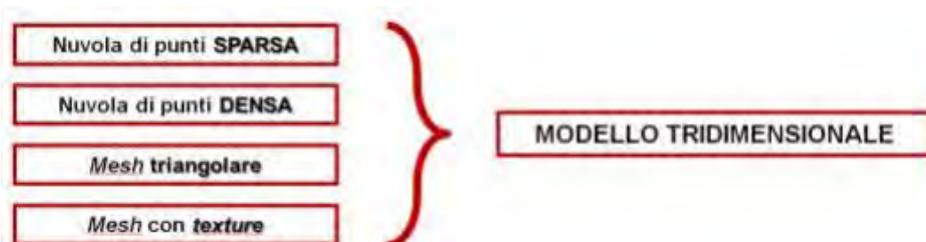


Fig.7.5.5: Processo di lavoro necessario per generare il modello 3D.

Prodotti derivati dal processo di elaborazione fotogrammetrica

Seguendo l'ordine imposto dal *data processing*, per generare il modello tridimensionale delle aree rilevate sono stati realizzati, in sequenza: i) la nuvola di punti sparsa/punti di vincolo; ii) la nuvola di punti densa; iii) la mesh triangolare/modello 3D; iv) la *textured mesh*/modello a tasselli, derivata dai fotogrammi acquisiti.

Una volta ricostruito il modello tridimensionale delle aree rilevate, attraverso specifici algoritmi di calcolo SfM (*Structure from Motion*), è stato possibile derivare:

- Digital Surface Model (DSM) georeferenziato con dimensione della cella ~ 25 cm/pixel (Figura 7.5.6);
- ortomosaico georeferenziato con risoluzione geometrica di ~ 10 cm/pixel.

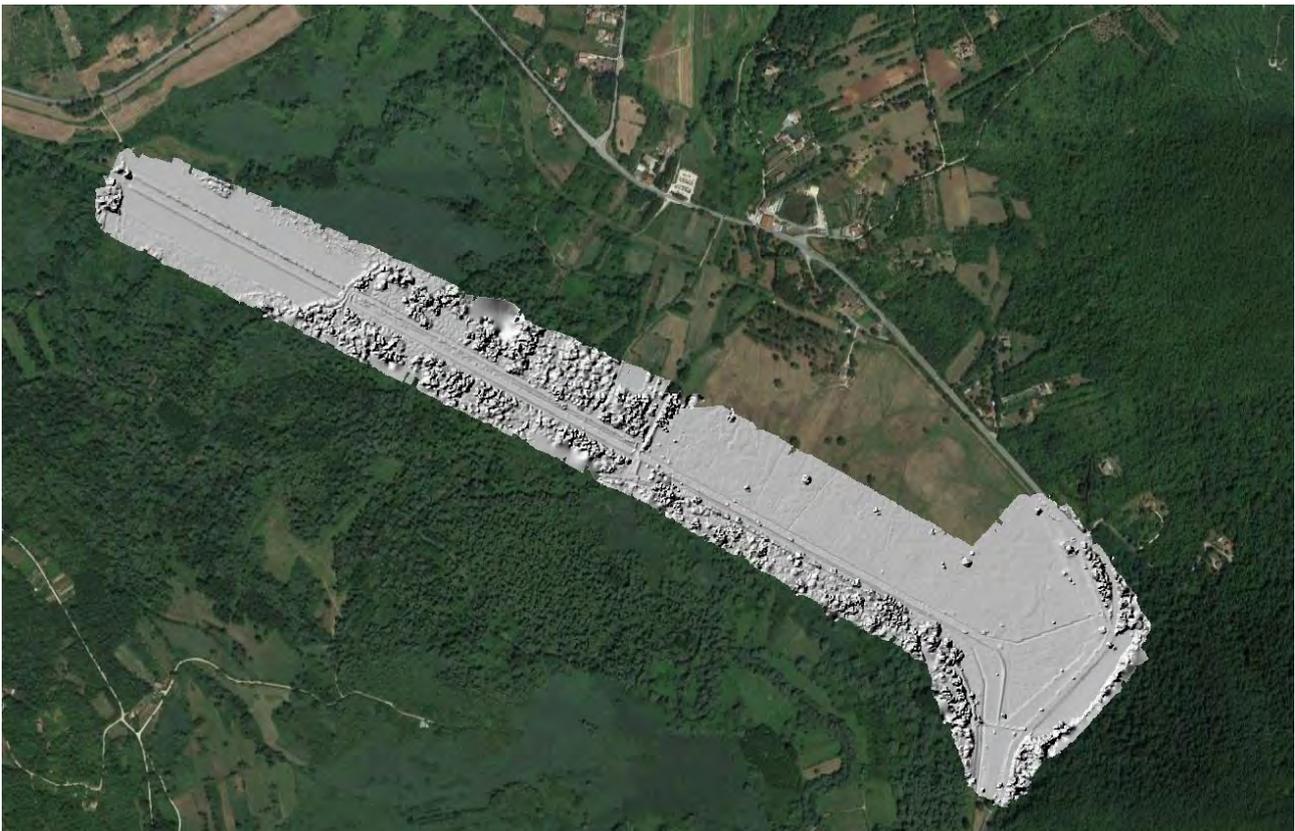


Fig.7.5.6: DSM dell'area rilevata nel mese di febbraio 2019.

8. Aspetti geotecnici – geomeccanici e strutturali

Nel seguente capitolo vengono riportate e discusse tutte le analisi che hanno contribuito alla definizione del modello concettuale geologico-tecnico dell'area di interesse e alla relativa istituzione di Unità Litotecniche che vanno a sintetizzare, sulla base dei parametri geologici e geotecnici, le caratteristiche dei materiali coinvolti nelle operazioni di scavo per la realizzazione dei tracciati di progetto.

I dati di base utilizzati per la parametrizzazione delle Formazioni Geologiche e delle Unità Litotecniche, sono stati desunti a partire dal rilevamento geomeccanico di campagna e dai risultati della campagna geognostica e geofisica effettuata.

8.1 Ammassi rocciosi - Caratterizzazione geomeccanica da rilevamento di campagna

Tra i mesi di maggio 2020 e luglio 2020 sono state effettuate n.19 stazioni geomeccaniche puntuali di tipo oggettivo (Figura 8.1.1). Queste hanno avuto come fine la caratterizzazione degli ammassi rocciosi (in termini di caratteristiche fisiche, meccaniche e dei parametri di deformabilità e resistenza) affioranti in un'area più estesa rispetto a quella che interessa la *Prima Fase Funzionale*.

In Tabella 8.1.1 sono evidenziate le informazioni anagrafiche di ogni stazione geomeccanica rilevata: la sigla identificativa (data dalla lettera K e da un numero progressivo), la data di esecuzione, le coordinate geografiche espresse in gradi decimali di latitudine e longitudine, l'altitudine, la distanza dai tracciati misurata perpendicolarmente ad essi, l'ipotetica entità delle coperture data dalla distanza verticale tra la quota a cui la stazione geomeccanica è stata rilevata e la quota della livelletta di scavo in quel punto, la formazione geologica alla quale è ascrivibile l'affioramento rilevato ed il rispettivo acronimo utilizzato nella cartografia geologica ufficiale CARG, così come riportato sui fogli n° 375 Tivoli e n° 366 Palombara Sabina.

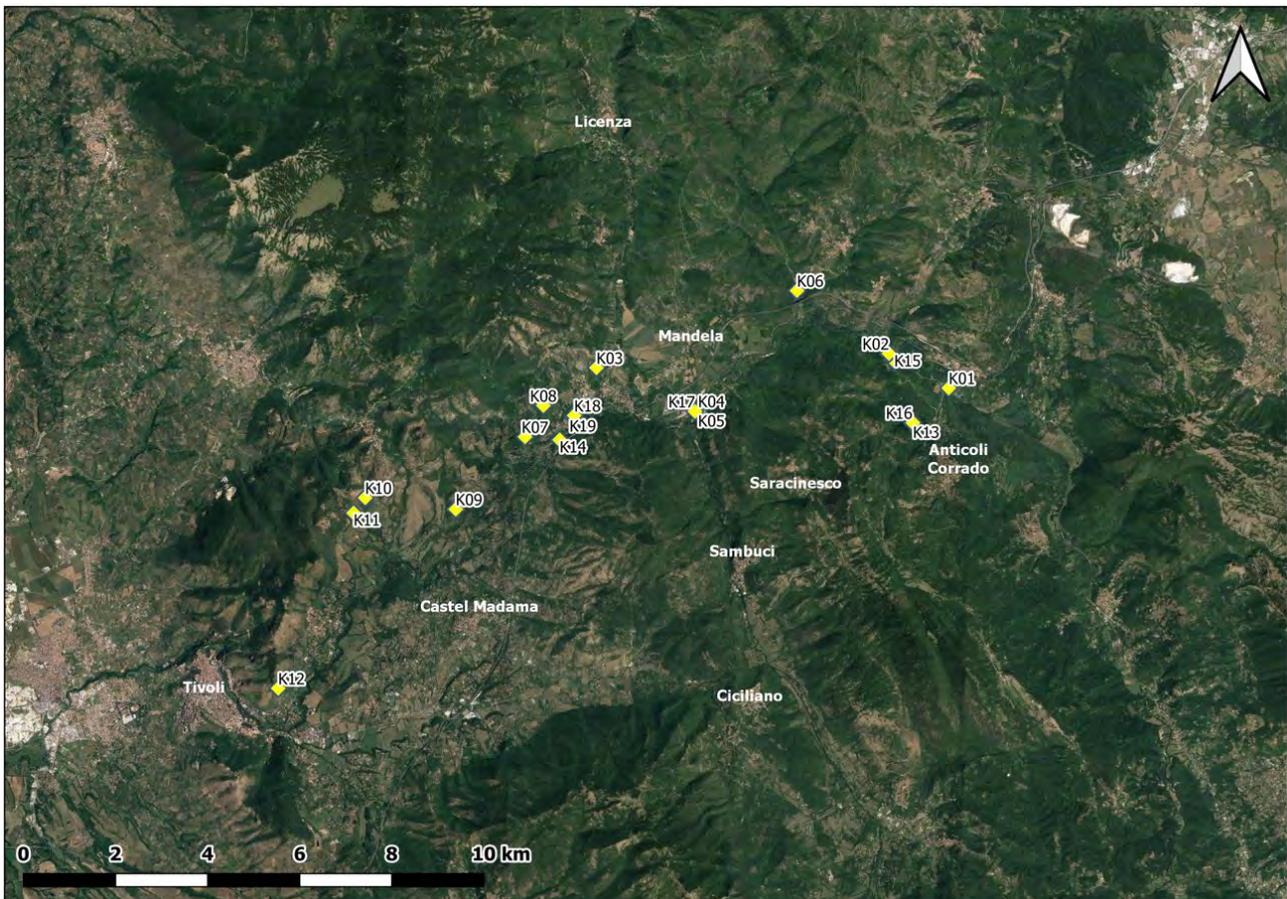


Fig. 8.1.1: Vista planimetrica riportante l'ubicazione delle stazioni geomeccaniche effettuate.

Tabella 8.1.1: Informazioni anagrafiche di base per ogni stazione geomeccanica effettuata.

Stazione Geomeccanica	Data esecuzione	Longitudine WGS84	Latitudine WGS84	Quota (m) s.l.m.	Copertura stazione (m)/ quota scavo TR2 approssimata	Copertura stazione (m)/ quota scavo TR4 approssimata	Distanza TR2 (m)	Distanza TR4 (m)	Formazione geologica	CARG
K01	25.06.20	12.991247	42.022996	360	50	50	25	408	Calcari a briozoi e litotamni - Calcareniti a briozoi	CBZ3
K02	25.06.20	12.975808	42.028934	338	35	35	101	171	Calcari a briozoi e litotamni - Calcareniti a punti rossi	CBZ2
K03	25.06.20	12.899140	42.024885	390	110	110	551	551	Scaglia Rossa	SAA
K04	02.07.20	12.926072	42.016879	302	15	15	127	222	Calcari a briozoi e litotamni - Calcareniti a punti rossi	CBZ2
K05	02.07.20	12.926040	42.016799	302	15	15	130	225	Calcari a briozoi e litotamni - Calcareniti a punti rossi	CBZ2
K06	02.07.20	12.951245	42.041166	344	50	50	524	784	Scaglia Detritica - Membro Calciruditico	SCZ2
K07	07.07.20	12.880933	42.010801	288	15	15	129	129	Scaglia Cinerea Detritica	CDZ
K08	07.07.20	12.885525	42.016971	358	80	80	106	106	Scaglia Rossa	SAA
K09	07.07.20	12.863166	41.996626	337	75	75	452	219	Sintema di Mandela	UMN
K10	09.07.20	12.839037	41.997614	420	165	135	1047	637	Maiolica	MAI
K11	09.07.20	12.836317	41.995182	386	130	100	940	515	Maiolica	MAI
K12	09.07.20	12.817649	41.960065	364	105	105	140	140	Maiolica	MAI
K13	29.07.20	12.982482	42.015464	407	100	100	676	1086	Unità Arenaceo - Pelitica	UAP
K14	29.07.20	12.889940	42.010570	278	5	5	715	715	Pozzolane Rosse	RED
K15	31.07.20	12.977166	42.027667	325	25	20	149	116	Calcari a briozoi e litotamni - Calcareniti a briozoi	CBZ3
K16	31.07.20	12.982482	42.015464	408	100	100	680	1090	Unità Arenaceo - Pelitica	UAP
K17	31.07.20	12.925555	42.017034	297	10	10	175	136	Sintema di Vicovaro	VCV
K18	31.07.20	12.893625	42.015512	299	20	20	390	390	Sintema di Mandela	UMN
K19	31.07.20	12.893325	42.015305	298	20	20	413	413	Sintema di Vicovaro	VCV

Obiettivo di tali indagini, in particolare, è stato quello di:

- Caratterizzare in ciascuna stazione di misura le discontinuità presenti nell'ammasso roccioso, in termini di parametri geometrici, morfologici e di alterazione, definendo inoltre i principali *set* di discontinuità;
- Ricavare per ogni stazione geomeccanica i parametri fisico-meccanici d'ammasso;
- Attribuire all'ammasso roccioso una classificazione in termini di *Rock Mass Rating* (RMR) e *Geological Strength Index* (GSI);
- Individuare i criteri per una possibile definizione di unità litotecniche tramite accorpamento e/o suddivisione delle Formazioni geologiche affioranti, sulla base dei parametri geomeccanici rilevati da affioramento e, in particolare, delle caratteristiche litologiche e di stato di fratturazione.

Il rilievo geomeccanico di tipo oggettivo (cioè tramite il censimento e la caratterizzazione di ogni discontinuità incontrata lungo più scan-line di riferimento) è stato condotto in accordo con le raccomandazioni IRSM (1978) e AGI (1993). Tutti i dati di seguito presentati si riferiscono alle condizioni d'ammasso a piano campagna, cioè laddove questo è stato rilevato. Il numero delle stazioni rilevate è stato determinato dall'ammissibilità delle condizioni di misura, dalla presenza di affioramenti di roccia adeguatamente accessibili in sicurezza, con scarsa o assente copertura vegetale e di estensione tale da garantire la significatività statistica dei dati misurati.

Operativamente, per ogni stazione geomeccanica, sono state effettuate le seguenti analisi (schema riassuntivo in Tabella 8.1.2):

- Rilevate tutte le discontinuità presenti lungo due *scan-line*, ortogonali tra loro, in termini di distanza progressiva, giacitura (*dip-direction/dip*), grado di alterazione, condizioni idrauliche, estensione, tipologia di terminazione, apertura e riempimento. In particolare, l'ammasso roccioso è stato classificato indicandone la tipologia (rispettivamente per grado di fratturazione crescente: massiccio, a blocchi, lastriforme, colonnare, irregolare, fratturato) e il grado di alterazione (I – fresca; II – leggermente alterata; III – moderatamente alterata; IV – fortemente alterata; V – completamente alterata; VI – suolo residuale). È stato,

inoltre, definito il numero di discontinuità presenti per metro cubo di roccia (J_v – Joint/m³), come:

$$J_v = \frac{nJ_1}{L} + \frac{nJ_2}{L} + \dots + \frac{nJ_n}{L}$$

La spaziatura totale media (S - cm), ossia la somma delle spaziature medie di

c' Coesione	ϕ' Angolo di attrito	Em Modulo di deformabilità di ammasso	
J_v Numero di giunti a m ³	S Spazializzazione totale media delle discontinuità	RQD Rock Quality Designation	STEREOPLOT Individuazione principali set di discontinuità

ogni famiglia di discontinuità sul numero di famiglie stesse:

$$S = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{n}$$

Il valore di RQD (*Rock Quality Designation* - %), il quale misura la qualità dell'ammasso roccioso, in termini di stato di fratturazione espressa dalla percentuale di ammasso che non presenta discontinuità per almeno 10 cm. In assenza di carote di sondaggio, l'RQD può essere calcolato direttamente in affioramento o secondo la relazione di Palmstron (1982):

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

(Risultati in Tabella 8.1.3 e 8.1.4).

- Per quanto riguarda le proprietà fisiche e meccaniche della matrice rocciosa, sui campioni prelevati in sito è stato calcolato in laboratorio il peso unità di volume (γ_n), tramite pesata idrostatica, ed è stata determinata la resistenza a compressione semplice indiretta (σ_c) tramite il *Point Load Test* (ASTM D5731,

2016). L'insieme dei dati acquisiti e la stima su base bibliografica di altri parametri e coefficienti hanno permesso di calcolare per ogni stazione di misura, con l'ausilio del *software* RocLab 1.0, i parametri di resistenza e deformabilità di ammasso secondo il criterio di rottura di Hoek-Brown (Hoek *et al.*, 2002), considerando un grado di disturbo (D) pari a zero. In accordo con Hoek *et al.* 2002, sono stati inoltre stimati i valori di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso in termini di coesione (c), angolo di attrito (ϕ) nel *range* di confinamento (σ_3) 0 – 7.5 MPa. (Risultati in Tabella 8.1.5)

- L'ammasso roccioso è stato classificato attribuendo il corrispondente valore di RMR (*Rock Mass Rating*; Bieniawsky 1989, 1993), e GSI per ammassi rocciosi fratturati (*Geological Strength Index*; Hoek & Marinos 2000) e modificato per materiali eterogenei nel caso di litologie a stratificazione alternata (Marinos & Hoek 2000). (Risultati in Tabella 8.1.6)

Tabella 8.1.2: Quadro d'insieme delle analisi condotte per ogni stazione geomeccanica.

PARAMETRI FISICO-MECCANICI	γ_n Peso per unità di volume	σ_c Resistenza a compression e semplice
CARATTERIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITÀ	Struttura d'ammasso o (ISRM)	Grado di alterazione (ISRM)
CLASSIFICAZIONI D'AMMASSO	GSI Geological Strength Index	RMR Rock Mass Rating

Tabella 8.1.3: Risultati della caratterizzazione delle discontinuità d'ammasso per ogni stazione geomeccanica effettuata.

Stazione Geomeccanica	CARG	Struttura Ammasso	Grado di Alterazione	J_v (J/m^3)	S(cm)	RQD (%)
K01	CBZ3	Irregolare	2 Legg. alterato	18,67	5,36	37,67
K02	CBZ2	Irregolare	2 Legg. alterato	9,50	10,80	61,50
K03	SAA	Fratturato	3 Mod. alterato	39,50	2,54	0,00
K04	CBZ2	A blocchi/Latrilforme	2 Legg. alterato	9,74	10,60	63,94
K05	CBZ2	Fratturato	3 Mod. alterato	19,67	5,10	14,33
K06	SCZ2	Fratturato	3 Mod. alterato	14,50	6,93	51,25
K07	CDZ	Irregolare	2/3 Legg./Mod. alterato	25,63	3,92	30,63
K08	SAA	A blocchi	2 Legg. alterato	27,75	3,87	17,25
K09	UMN	A blocchi	2 Legg. alterato	8,30	12,13	66,20
K10	MAI	A blocchi	2 Legg. alterato	13,50	7,42	55,50
K11	MAI	Lastriforme	2 Legg. alterato	30,50	3,39	3,57
K12	MAI	Fratturato	2 Legg. alterato	26,00	3,88	14,00
K13	UAP	Lastriforme/Irregolare	3 Mod. alterato	8,45	11,99	79,74
K14	RED	A blocchi	2 Legg. alterato	5,30	18,93	89,10
K15	CBZ3	Irregolare	2 Legg. alterato	7,78	14,91	66,22
K16	UAP	A blocchi/Irregolare	2 Legg. alterato	21,56	4,86	40,67
K17	VCV	A blocchi	2 Legg. alterato	25,75	3,88	30,00
K18	UMN	A blocchi	3 Mod. alterato	8,30	12,13	66,20
K19	VCV	A blocchi	3 Mod. alterato	28,78	3,47	20,00

Tabella 8.1.4: Principali set di discontinuità per ogni stazione geomeccanica effettuata.

CARG	Stazione	(dip direction, dip)				
		J ₀ (strat.)	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄
CBZ3	K01	45,15	40,60	130,40	120,60	260,70
CBZ2	K02	120,35	30,60	210,20	50,80	350,60
SAA	K03	345,80	320,20	20,40	190,40	235,45
CBZ2	K04	270,40	90,45	130,45	210,85	
CBZ2	K05	250,45	360,70	140,55	290,85	
SCZ2	K06	310,35	170,85	340,40		
CDZ	K07	160,60	270,80	330,80	360,70	220,50
SAA	K08	260,35	60,70	330,80	160,10	
UMN	K09	200,15	360,80	210,70	300,70	
MAI	K10	220,35	50,70	330,75	160,80	350,65
MAI	K11	150,60	40,80	340,50	240,60	300,40
MAI	K12	300,45	10,70	350,70	90,65	
UAP	K13	210,45	210,65	60,45	240,55	300,60
RED	K14	orizzontale	210,70	360,80		
CBZ3	K15	300,40	50,60	270,60		
UAP	K16	210,45	240,45	110,65	30,50	
VCV	K17	240,10	240,65			
UMN	K18	240,10				
VCV	K19	240,15	270,60			

Tabella 8.1.5: Risultati delle stime degli indici fisico – meccanici per ogni stazione geomeccanica effettuata.

Stazione Geomeccanica	CARG	γ_n (g/cm ³)	Is(50) (MPa)	σ_c (MPa)	RocLab - Mod. General		
					c (Mpa)	ϕ°	Em (Mpa)
K01	CBZ3	2,54	3,71	83,48	3,82	29,04	6138,3
K02	CBZ2	2,66	5,02	112,95	6,64	33,45	20365,0
K03	SAA	2,63	5,86	131,85	3,82	21,35	1050,4
K04	CBZ2	2,70	5,67	127,58	7,46	33,45	20355,0
K05	CBZ2	2,70	4,40	99,00	4,55	29,04	6138,3
K06	SCZ2	2,70	6,29	141,53	5,06	24,30	2567,2
K07	CDZ	2,56	3,49	78,53	3,06	25,75	3985,6
K08	SAA	2,63	3,70	83,25	4,21	30,08	13965,2
K09	UMN	2,60	5,09	114,53	9,79	43,45	43223,8
K10	MAI	2,68	3,77	84,83	5,21	32,93	28718,6
K11	MAI	2,68	4,29	96,53	4,11	27,20	6138,3
K12	MAI	2,68	3,65	82,13	3,82	28,64	9340,7
K13	UAP	2,59	1,10	24,75	1,26	32,06	3985,6
K14	RED	1,76	1,70	38,25	2,60	37,21	28718,6
K15	CBZ3	2,70	4,38	98,55	6,37	34,89	28718,0
K16	UAP	2,59	1,10	24,75	1,36	33,57	6138,3
K17	VCV	2,25	2,07	46,58	2,69	35,08	9340,7
K18	UMN	2,60	5,09	114,53	9,79	43,45	43223,8
K19	VCV	2,50	1,77	39,83	2,02	32,06	3985,6

Tabella 8.1.6: Risultati delle classificazioni d'ammasso per ogni stazione geomeccanica effettuata.

Stazione Geomeccanica	CARG	RMR	Classe RMR	GSI
K01	CBZ3	48	III	45
K02	CBZ2	61	IV	60
K03	SAA	50	III	25
K04	CBZ2	59	III	60
K05	CBZ2	54	III	45
K06	SCZ2	63	IV	35
K07	CDZ	52	III	40
K08	SAA	45	III	55
K09	UMN	68	IV	72
K10	MAI	60	III	65
K11	MAI	48	III	45
K12	MAI	45	III	50
K13	UAP	61	IV	40
K14	RED	63	IV	65
K15	CBZ3	67	IV	65
K16	UAP	51	III	45
K17	VCV	55	III	50
K18	UMN	68	IV	72
K19	VCV	47	III	40

La Tabella 8.1.7 fornisce un quadro riassuntivo dei risultati ottenuti, mostrando i valori medi dei parametri geomeccanici per le dieci Formazioni geologiche indagate. Bisogna tenere però in considerazione che il numero di stazioni geomeccaniche effettuate non è uniforme per le diverse formazioni affioranti lungo il tracciato della galleria in progettazione, pertanto i valori medi restituiti presentano una affidabilità che diminuisce al diminuire del numero di stazioni effettuate per ogni formazione.

Tabella 8.1.7: Quadro riassuntivo dei risultati ottenuti. I valori presenti sono la media dei singoli valori ottenuti nelle stazioni geomeccaniche effettuate.

Formazione geologica (CARG)	N° stazioni	Jv (joint/m3) medio	S (cm) medio	RQD (%) medio	γ_n (g/cm ³) medio	σ_c (MPa) medio	c (Mpa) medio	ϕ° medio	Em (Mpa) medio	RMR medio	GSI medio
CBZ3	2	13,22	10,14	51,94	2,62	91,01	5,09	31,97	17428,2	57,5	55,0
CBZ2	3	12,97	8,83	46,59	2,69	113,18	6,22	31,98	15619,4	58,0	55,0
CDZ	1	25,63	3,92	30,63	2,56	78,53	3,06	25,75	3985,6	52,0	40,0
SCZ2	1	14,50	6,93	51,25	2,70	141,53	5,06	24,30	2567,2	63,0	35,0
SAA	2	33,63	3,20	8,63	2,63	107,55	4,02	25,72	7507,8	47,5	40,0
UMN	2	8,30	12,13	66,20	2,60	114,53	9,79	43,45	43223,8	68,0	72,0
MAI	3	23,33	4,90	24,36	2,68	87,83	4,38	29,59	14732,5	51,0	53,3
UAP	2	15,00	8,42	60,20	2,59	24,75	1,31	32,82	5061,9	56,0	42,5
RED	1	5,30	18,93	89,10	1,76	38,25	2,60	37,21	28718,6	63,0	65,0
VCV	2	27,27	3,68	25,00	2,38	43,20	2,35	33,57	6663,1	51,0	45,0

Al fine di produrre un modello geologico tecnico dell'area di interesse, i dati sopra riportati sono stati elaborati cercando di valutare possibili correlazioni dello stato d'ammasso con le litologie e le formazioni geologiche presenti sul territorio. Dalla Tabella 8.1.7 e dai grafici di seguito riportati (Figura 8.1.2, Figura 8.1.3, Figura 8.1.4 e Figura 8.1.5) si evince che:

- Lo stato di fratturazione d'ammasso, di cui si porta a rappresentanza la distribuzione di Jv in Figura 8.1.2, ha una forte variabilità sia intra-formazionale che inter-formazionale. Tale distribuzione di valori difficilmente permette di identificare una risposta univoca dell'ammasso roccioso alle sollecitazioni tettoniche subite. Infatti, poiché l'areale di interesse ha una superficie molto ampia, la stessa formazione geologica può presentarsi con gradi di fratturazione variabili, principalmente determinati dalla vicinanza con elementi tettonici anche a piccola scala di cui non si conosce l'esatta ubicazione.

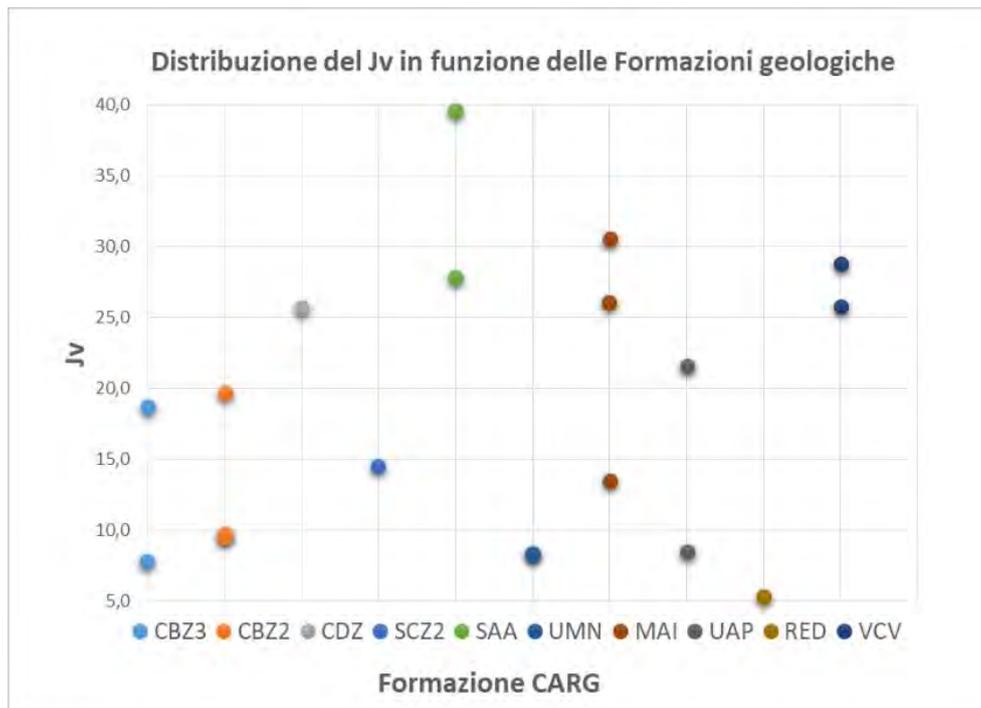


Figura 8.1.2: Distribuzione del Jv in funzione delle formazioni geologiche. Ogni pallino rappresenta una stazione geomeccanica.

- Le caratteristiche fisico – meccaniche, di cui si porta a rappresentanza la distribuzione di σ_c in Figura 8.1.3, mostrano una variabilità che fondamentalemente dipende in maniera quasi esclusiva dalla litologia della matrice rocciosa, ed è quindi pressoché esente da variazioni locali indotte da stress tettonici. Risulta infatti che le litologie più tenere, come le piroclastiti (RED) o i depositi di flysch (UAP), si attestano su valori di resistenza a compressione semplice non superiori a 30-40 MPa. Concentrando l'attenzione, invece, verso litologie più cementate e competenti, fino ad arrivare ai membri calciruditici della scaglia detritica (SCZ) od ai fortemente cementati conglomerati dell'Unità di Mandela (UMN), si assiste ad un incremento dei valori della σ_c , superando i 100 MPa.

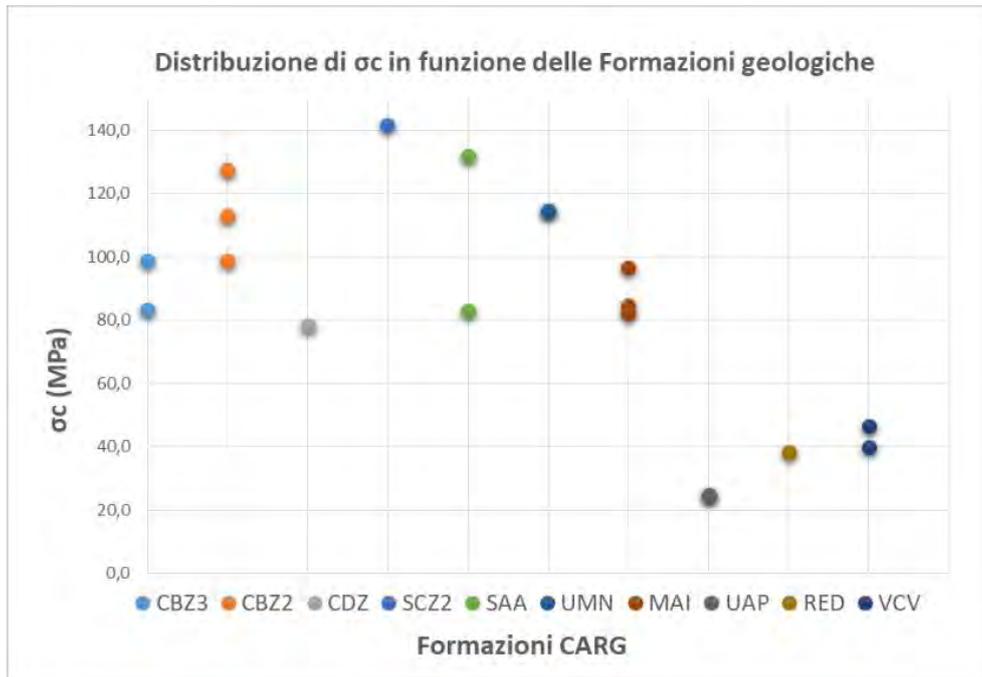


Figura 8.1.3: Distribuzione del σ_c in funzione delle formazioni geologiche. Ogni pallino rappresenta una stazione geomeccanica.

- Quanto detto nei due punti precedenti è chiaramente mostrato in Figura 8.1.4 e Figura 8.1.5, dove si riporta rispettivamente la distribuzione di RMR e GSI nelle diverse formazioni geologiche. Poiché il GSI tiene principalmente conto dello stato di fratturazione d'ammasso, il suo range di variabilità, per i motivi sopra discussi, risulta essere abbastanza ampio con un massimo di 72 registrato per la Formazione UMN ed un minimo di 25 per la Formazione SAA. La classificazione d'ammasso RMR, il quale invece tiene conto anche delle caratteristiche fisiche dell'ammasso, mostra invece valori compresi tra 45 e 68, quindi relativamente più vicini.

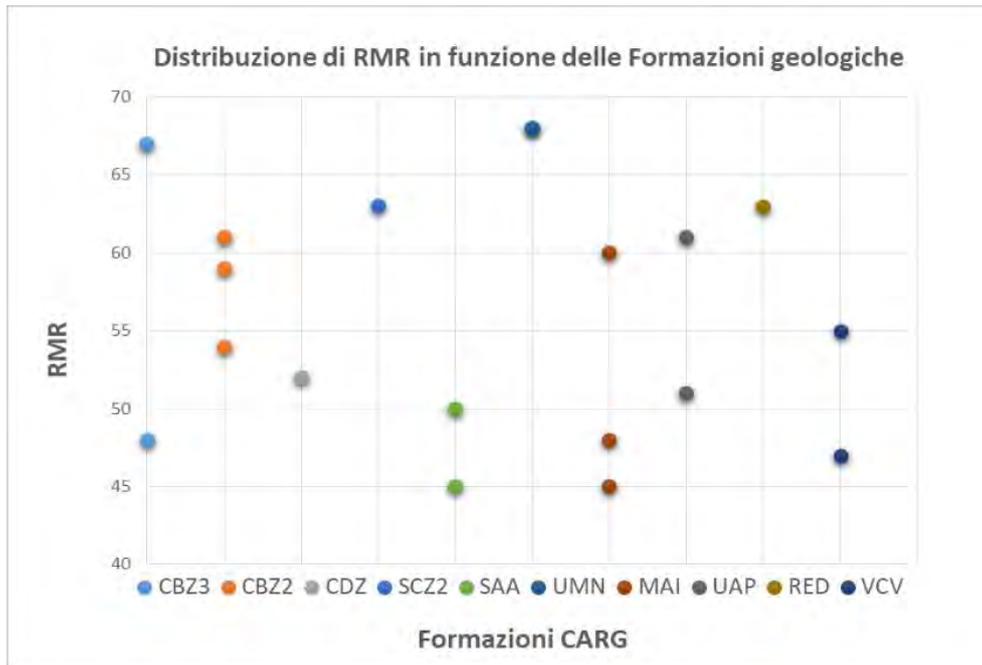


Figura 8.1.4: Distribuzione del RMR in funzione delle formazioni geologiche. Ogni pallino rappresenta una stazione geomeccanica.

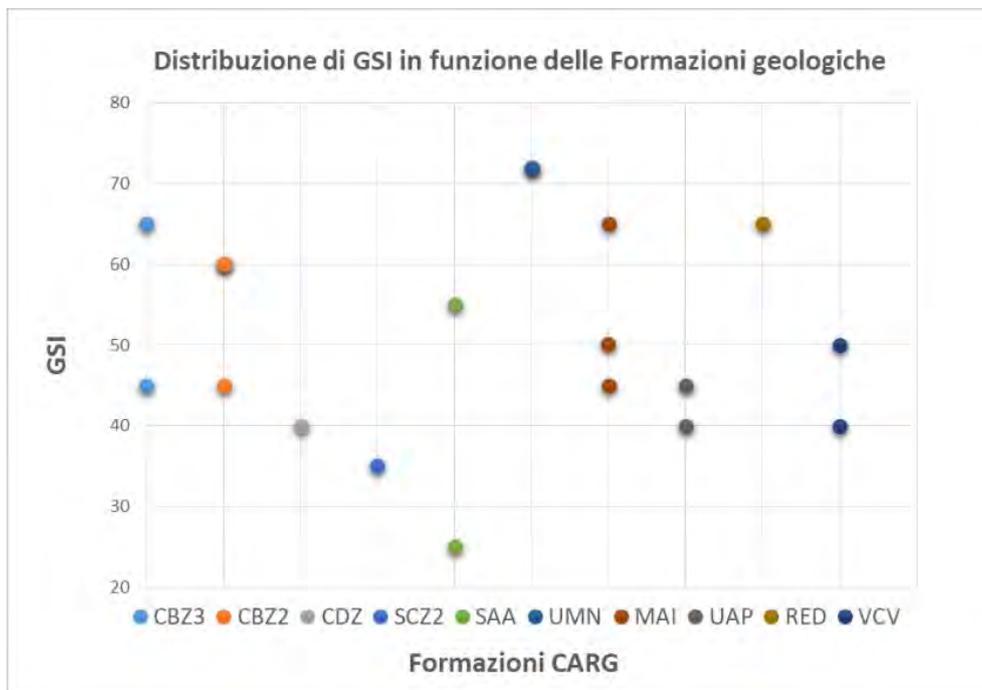


Figura 8.1.5: Distribuzione del GSI in funzione delle formazioni geologiche. Ogni pallino rappresenta una stazione geomeccanica.

8.2 Ammassi Rocciosi – Unità Litotecniche sulla base del rilevamento geomeccanico

Rispettivamente in Tabella 8.2.1 e 8.2.2, si riporta un quadro d'insieme delle Unità Litotecniche, proposte al successivo paragrafo "8.4 – Unità Litotecniche", con indicazione delle Formazioni geologiche litoidi presenti nell'area relativa alla *Prima Fase Funzionale*, ed i valori medi dei principali parametri geomeccanici di ogni Unità Litotecnica così determinata. Le due tabelle fanno particolare riferimento alle Unità Litotecniche caratterizzate con i metodi e criteri del rilevamento geomeccanico di campagna; vengono quindi riportate le informazioni di quelle che presentano una litologia interamente, o almeno in parte, litoide.

Tabella 8.2.1: Quadro sinottico delle Formazioni Geologiche afferenti alle varie Unità Litotecniche litoidi proposte. Le Formazioni in grassetto sono quelle analizzate durante il rilevamento geomeccanico di campo. Le Formazioni in corsivo non sono state analizzate direttamente, ma si ritiene possano essere assimilabili per similitudine delle caratteristiche litologiche e geomeccaniche.

Unità litotecnica	Formazioni
A – Unità litotecnica delle formazioni carbonatiche fratturate	CBZ₃ – SCZ₂
B – Unità delle formazioni con possibile stratificazione alternata	CBZ₂ – SPT I a – SPT I b – UAM – CFR – CDZ
C – Unità litotecnica dei depositi silicoclastici sin-orogenici	UAP

Tabella 8.2.2: Valori medi dei principali indici d'ammasso desunti da rilevamento geomeccanico di campagna per le Unità Litotecniche proposte.

Sigla	A	B	C
Unità litotecnica	Unità litotecnica delle formazioni carbonatiche fratturate	Unità delle formazioni con possibile stratificazione alternata	Unità litotecnica dei depositi silicoclastici sin-orogenici
γ_n (g/cm ³) medio	2.6	2.7	2.6
σ_c (Mpa) medio	94.4	111.9	24.8
J_v (J/m ³) medio	23	16	15
RMR_{v3} medio	52	58	56
GSI medio	50	48	43

8.3 Unità Litotecniche

Dalle considerazioni di carattere geologico trattate nei precedenti capitoli, dalle informazioni di carattere geomeccanico raccolte mediante rilevamento di campagna e dai dati desunti dalla campagna geognostica effettuata, è possibile proporre l'istituzione delle seguenti Unità Litotecniche schematizzate nella Tabella 8.3.1.

Tabella 8.3.1: Quadro riassuntivo delle Formazioni Geologiche afferenti alle varie Unità Litotecniche proposte. Le sigle delle Formazioni Geologiche afferenti ad ogni Unità Litotecnica sono evidenziate in grassetto, qualora analizzate durante il rilevamento geomeccanico di campagna, ed in corsivo, qualora analizzate durante campagna geognostica in almeno una prova di laboratorio o indagine di sito.

Sigla	Unità litotecniche	Formazioni
A	Unità litotecnica delle formazioni carbonatiche fratturate	CBZ₃ – SCZ₂
B	Unità delle formazioni con possibile stratificazione alternata	CBZ₂ – SPT1a – SPT1b – UAM – CFR – CDZ
C	Unità litotecnica dei depositi silicoclastici sin-orogenici	UAP
H	Unità litotecnica dei terreni delle coperture	b – b2 – bv - a

Le Unità Litotecniche vanno quindi a sintetizzare le principali Formazioni geologiche presenti nell'area di indagine, sulla base dei caratteri di similitudine e assimilabilità litologica, e dei parametri geotecnici ottenuti dalle indagini e prove eseguite in sito ed

in laboratorio. Nel definire la proposta di Unità Litotecniche si è data priorità al carattere litologico, geologico e formazionale, poi avvalorato e parametrizzato quantitativamente a partire dai dati geotecnici in possesso. Il range di variabilità dei parametri geotecnici di ogni Unità Litotecnica è principalmente determinato dalla variabilità litologica intrinseca delle Formazioni afferenti all'Unità stessa e, nel caso di ammassi rocciosi, dall'eventuale prossimità con elementi tettonici, diffusamente distribuiti nell'area di progetto.

Vengono di seguito descritte le principali caratteristiche delle Unità Litotecniche istituite. A supporto delle descrizioni si fa riferimento ai grafici e tabelle riportati da Figura 8.3.1. I valori medi dei principali parametri desunti per ogni Unità Litotecnica sono riportati in Tabella 8.3.2 e Tabella 8.3.3: l'affidabilità del valore medio restituito è direttamente proporzionale al numero di dati a disposizione e inversamente proporzionale alla variabilità litologica intrinseca dell'Unità Litotecnica. Di seguito sono elencate e descritte le unità proposte:

- A: Unità Litotecnica delle Formazioni Carbonatiche Fratturate (CBZ₃ - SCZ₂):** afferiscono tutte le Formazioni geologiche litoidi che presentano una matrice esclusivamente calcarea. Si assume per questa unità litotecnica una discreta variabilità del grado di fratturazione degli ammassi, principalmente determinata dalla vicinanza con elementi tettonici anche di piccola entità, come si evince dai grafici delle Figure 8.3.8 e 8.3.9, le quali evidenziano valori alquanto differenti dei valori di RQD e Jv (effettuati su carote di sondaggio), anche a profondità relativamente contigue. A testimonianza di ciò, dalle Figure 8.3.6 e 8.3.7, si può notare anche l'ampia variabilità dei valori di Ed ed Ee, provenienti da prove dilatometriche in roccia effettuate in foro, che sostanzialmente non mostrano un trend in aumento con la profondità di indagine, ma plausibilmente connesso con la fratturazione indotta da elementi tettonici sepolti. I restanti parametri geotecnici rivelano range di variabilità meno ampi, ed è fondamentalmente pronosticabile tramite la valutazione della matrice calcarea in esame (rispettivamente per parametri fisico-meccanici crescenti: calcilutite, calcarenite o calcirudite). Si può quindi affermare che la matrice rocciosa presenta dei caratteri abbastanza omogenei sia arealmente che in profondità, a differenza delle caratteristiche di fratturazione d'ammasso, le quali sono invece estremamente dipendenti dalla vicinanza ad elementi tettonici anche di piccole entità e difficilmente rilevabili.

- B: Unità Litotecnica delle Formazioni con possibile Stratificazione Alternata** (CBZ₂ – SPT1a – SPT1b – UAM – CFR – CDZ): è caratterizzata da Formazioni geologiche che possono presentare un’alternanza di calcari e marne. In conseguenza dell’ambiente deposizionale di transizione tra piattaforma carbonatica e ambiente pelagico, che ha caratterizzato l’area, la percentuale di orizzonti marnosi all’interno della stessa Formazione è molto variabile arealmente, passando da rari strati centimetrici fino a più del 50% della matrice rocciosa. La deformazione del litotipo può quindi seguire sia le discontinuità che interessano l’ammasso roccioso sia essere guidata dalla presenza di weak-planes rappresentati dallo strato marnoso. La presenza di questi weak-planes è, ancora una volta, resa evidente in molte delle prove effettuate, particolarmente visibile negli schemi presenti in Figura 8.3.4 e Figura 8.3.5, che riportano rispettivamente i valori di modulo di Young (ricavato dal modulo pressiometrico) e pressione limite con range molto ampi. Stesso tipo di osservazione può essere fatta nei diagrammi ricavati dalla prova a compressione triassiale su roccia, Figura 8.3.17 e Figura 8.3.18, rimarcando la variabilità della componente marnosa presente all’interno dell’unità in riferimento ai differenti valori di c e ϕ ottenuti. L’elevato numero di dati acquisiti dalle prove a compressione uniassiale e brasiliana, descritti rispettivamente dai grafici in Figura 8.3.16 e Figura 8.3.23, permette di determinare in maniera robusta il range di variabilità dei parametri di resistenza a compressione uniassiale σ_c e resistenza a trazione σ_t dell’unità analizzata. Infine, dai grafici in Figura 8.3.10 e Figura 8.3.11, che fanno rispettivamente riferimento ai coefficienti di permeabilità determinati a partire da prove Lefranc, si evidenzia come l’Unità Litotecnica, in funzione delle caratteristiche litologiche sito specifiche, possa rappresentare sia un orizzonte di aquitard/aquiclude (con valori di coefficiente di permeabilità k relativamente bassi) sia una conducibilità idraulica elevata (principalmente associata al reticolo di fratture presente nell’ammasso roccioso).
- C: Unità Litotecnica dei Depositi Silicoclastici Sin-orogenici** (UAP): afferiscono i depositi di flysch presenti nell’area. Caratteristica principale di questa unità è la presenza di un ammasso roccioso composto da arenaria litoide, subordinatamente alternato a strati marnosi con caratteristiche geotecniche compatibili con quelle di una roccia tenera per le fasce meno alterate, ed a quelle di una terra compatta per le fasce più alterate. Le prove condotte su questa specifica unità siano state eseguite nel solo

sondaggio S4. Nonostante ciò, è possibile comunque avvalorare quanto desunto da rilevamento di campagna sulle caratteristiche dell'ammasso. Osservando i grafici in Figura 8.3.15 e Figura 8.3.16, che riportano rispettivamente il peso per unità di volume γ_n e la resistenza a compressione uni assiale σ_c ricavati dalle analisi di laboratorio, si desume che le litologie investigate sono del tutto assimilabili a quelli di un elemento prevalentemente litoide e arenaceo; esaminando inoltre lo schema grafico di Figura 8.3.11, si ricava un valore del coefficiente di permeabilità "k", desunto da prova Lefranc, relativamente basso e compatibile con la presenza di granulometrie fini intervallate nei vari orizzonti di strato e a riempimento delle fratture. Il valore di permeabilità desunto dalla prova sembrerebbe stimare una conducibilità idraulica compatibile con quella degli altri ammassi rocciosi caratterizzati da alternanze di materiali più e meno permeabili (Figura 8.3.10).

- H: Unità Litotecnica dei Terreni delle coperture recenti e quaternarie** (b – b2 - a): costituita da terreni eluvio-colluviali e di piana alluvionale prevalentemente sciolti, affioranti principalmente lungo Valle del Fiume Aniene. Le stratigrafie di sondaggio acquisite dimostrano una notevole variabilità nelle litologie caratteristiche di questi depositi, con sedimenti tipici di acque a bassa energia (limi e argille), alternate a spessi strati di sabbie e ghiaie, e possibili intercalazioni di materiale travertinoso sciolto e litoide. L'eterogeneità di questi depositi è visibile in quasi tutti i grafici di seguito esposti, i quali, grazie all'elevato numero di dati raccolti, permettono di mostrare i range di variabilità presenti nei depositi alluvionali. L'Unità Litotecnica 'H', in considerazione dell'eterogeneità dei depositi in essa presenti, è stata suddivisa in numero 4 litofacies differenziate fra loro principalmente su base granulometrica (Argille limose debolmente sabbiose/limi argillosi, sabbie limose debolmente argillose, ghiaie sabbiose, brecce calcaree). Per quanto riguarda il tratto comune di partenza (da Manufatto Origine a Manufatto Nodo A), il volume significativo delle opere di progetto interagisce con due litofacies, motivo per il quale si è proposta una loro caratterizzazione geotecnica di dettaglio principalmente con l'ausilio dei campioni indisturbati prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi S1 ed S2 (A250PDS G006 0). Diversamente, per i tratti dove le tecnologie di scavo prevedono una modalità in microtunneling (TR2 e TR4), le opere di progetto intersecano tutte le litofacies identificate. Per questo motivo, la classificazione geotecnica proposta per tali tratti non prevede sottocategorie, basate

sulle singole litofacies identificate, bensì caratterizza i depositi alluvionali nel loro complesso, tenendo conto dell'eterogeneità presenti lungo il tracciato.

A valle del Piano Integrativo di Indagini verrà fornita una caratterizzazione geotecnica delle litofacies presenti nei tratti interessati da scavo in microtunneling (TR2 e TR4).

Tabella 8.3.2: Valori medi dei principali parametri geotecnici desunti da prove geotecniche in sito e prove geotecniche di laboratorio.

SIGLA	UNITÀ LITOTECNICA	PARAMETRI DI STATO			S.P.T.			RQD	LEFRANC	TAGLIO DIRETTO	
		γ_n (kN/m ³)	e	n (%)	Nspt	Dr (%)	lc	Jv (j/m ³)	K (m/s)	c'(kPa)	Φ' (°)
A	Formazioni carbonatiche fratturate	23.8		14.6				14	1.3 E-03		
B	Formazioni con possibile stratificazione alternata	24.5		9	51			10	3.8 E-05		
C	Depositi silicoclastici sin-orogenici	25.2							2.3 E-05		
H (TC1)	Terreni delle coperture recenti e quaternarie Argille limose debolmente sabbiose / limi argillosi	18.5	0.8	46-49						17-25	25
	Terreni delle coperture recenti e quaternarie Sabbie limose debolmente argillose	19.0	0.8	46-49						13-21	24
H (TR2 - TR4)	Terreni delle coperture recenti e quaternarie	18.6	0.8	43.7	19	48	0.8		2.4 E-04	16	25

SIGLA	UNITÀ LITOTECNICA	EDOMETRICA			E.L.L.		COMPR. UNIASSIALE	COMPR. TRIASSIALE		PRESSIOMETRICA		DILATOMETRICA		BRASILIANA	DOWN HOLE
		Ed (MPa)	cv (cm ² /s)	k(m/s)	σ_r (kPa)	cu(kPa)	σ_c (MPa)	C_u (MPa)	Φ_u (°)	E (MPa)	Pl (MPa)	Ed (MPa)	Ee (MPa)	σ_r (kPa)	Vs (m/s)
A	Formazioni carbonatiche fratturate						42.8			1363	10.6	437	542		587
B	Formazioni con possibile stratificazione alternata						47.7	8.1	36	1549	28.9			5.3	714
C	Depositi silicoclastici sin-orogenici						57.8								
H (TC1)	Terreni delle coperture recenti e quaternarie Argille limose debolmente sabbiose / limi argillosi	2.0 - 7.0													
	Terreni delle coperture recenti e quaternarie Sabbie limose debolmente argillose	3.0 - 5.0													
H (TR2 - TR4)	Terreni delle coperture recenti e quaternarie	6.6	8.8 E-04	1.7 E-10	208	104	1.1			68	4.9				387

Tabella 8.3.3: Valori medi dei principali indici d'ammasso desunti da rilevamento geomeccanico di campagna per le Unità Litotecniche esaminate.

valori medi dei principali indici d'ammasso roccioso desunti da rilevamento geomeccanico

SIGLA	UNITÀ LITOTECNICA	γ_n (kN/m ³)	σ'_c (MPa)	J_v (j/m ³)	RMR	GSI
A	Formazioni carbonatiche fratturate	26.0	94.4	23	III (52)	50
B	Formazioni con possibile stratificazione alternata	27.0	111.9	16	III (58)	48
C	Depositi silicoclastici sin-orogenici	26.0	24.8	15	III (56)	43

Per quanto riguarda i depositi alluvionali che sono presenti nella Piana di Mola di Regno e nella Piana di Pantano, si propone una caratterizzazione geologico-tecnica di dettaglio. Di seguito i modelli geologico-tecnici di riferimento per i manufatti Origine e Nodo A e per il tracciato intermedio con scavo a cielo aperto compreso tra i due manufatti.

Per il manufatto Origine e Nodo A si sono presi come riferimento rispettivamente il Sondaggio S1 ed S2, le relative prove in situ e, soprattutto, i risultati delle prove di laboratorio geotecnica condotte sui campioni indisturbati. Per il tracciato intermedio ai due manufatti, si sono integrati i risultati dei sondaggi S1 ed S2 con quelli delle 16 prove CPTu eseguite.

Tabella 8.3.4: modello geologico tecnico Piana Mola di Regno-Piana di Pantano

UNITA'	Prof.	γ_{nat}	c'	ϕ'	E_{ed}
	m	kN/m ³	kPa	°	MPa
Limo argilloso debolmente sabbioso	0.0 – 7.0	18.5	17-25 (med 21)	25	2.0 – 7.0
Limo argilloso sabbioso	7.0 – 13.0	19.0	13-21 (med 17)	24	3.0 – 5.0

Tabella 8.3.5: modello geologico tecnico manufatto Origine

UNITA'	Prof.	γ_{nat}	c'	ϕ'	E_{ed}	σ
	m	kN/m ³	kPa	°	MPa	kPa
Terreno di riporto	0.0 – 1.8	16	0	25	2.0	-
Limo argilloso debolmente sabbioso	1.8 – 16.0	18.5	21 – 31 (med 26)	26	2.0 – 8.0	250
Ghiaia sabbiosa, sciolta, con clasti di grandi dimensioni	16.0 – 24.0	20.0	0 - 5	30	5.0 – 8.0	-

Tabella 8.3.6: modello geologico tecnico manufatto Nodo A

UNITA'	Prof.	γ_{nat}	c'	ϕ'	E_{ed}	σ
	m	kN/m ³	kPa	°	MPa	kPa
Limo argilloso debolmente sabbioso	0.0 – 3.5	18	17	23	1.7	230
Limo argilloso sabbioso	3.5 – 10.0	18.7	10	23	2.0 – 3.0	140
Sabbie debolmente limose-argillose	10.0 – 20.0	19	13	32	3.0 – 5.0	160
Ghiaie e sabbie ghiaiose alternate a sabbie limose	20.0 – 30.0	20.0	0 - 5	30	5.0 – 8.0	-

9. Considerazioni conclusive

L'area di studio si sviluppa lungo la Valle dell'Aniene, in provincia di Roma e comprende in particolare il tratto di valle compreso tra i comuni di Agosta e Mandela. Tale zona è caratterizzata dalla presenza del Fiume Aniene che ne determina la vallata principale. L'asta fluviale, di una lunghezza pari a circa 30 km, riceve lungo il suo percorso il contributo di alcuni effluenti tra cui il Torrente Fiumicino, il Fosso dell'Empiglione, il Torrente Licenza, il Torrente Ferrata, il Fosso dei Ronci.

L'area attraversata dal Fiume Aniene è prevalentemente montuosa (dorsali dei Monti Simbruini, Monti Cantari, Monti Affilani, Monti Ruffi) con rilievi che si aggirano intorno ai 2.000 mt. (Monte Autore, Monte Cotento, Monte Tarino, Monte Viglio).

L'area di intervento riguarda, quindi, un sistema vallivo ben definito e geograficamente omogeneo, che si estende con continuità lineare lungo il Fiume Aniene articolandosi attorno all'insieme dei bacini idrografici e dei territori che da esso dipendono.

L'Appennino Centrale è un sistema catena-avanfossa vergente verso il Mare Adriatico (Bally et al., 1986; Patacca et al., 1991; Cosentino et al., 2010) e la sua strutturazione avviene per effetto della subduzione verso Ovest della crosta continentale che costituisce l'avampaese adriatico (Doglioni et al., 1996). La fase orogenica compressiva ha inizio nel Miocene e procede tramite la migrazione verso NE del fronte compressivo, tuttora in atto (Bally et al., 1986; Boccaletti et al., 1990; Patacca et al., 1991). Durante la fase orogenica giocano un ruolo molto importante le numerose faglie dirette pre-orogeniche che controllano la fisiografia dei bacini di avanfossa e influiscono sulle traiettorie dei sovrascorrimenti più importanti (Bigi & Costa Pisani, 2005; Tavarnelli et al., 2004; Carminati et al., 2014).

L'area studiata segue l'andamento della valle del Fiume Aniene, che si sviluppa tra le dorsali dei Monti Ruffi e dei Monti Tiburtini in sinistra idrografica, mentre in destra idrografica si collocano i Monti Simbruini e i Monti Sabini/Lucretili.

Le strutture sabine sono delimitate verso Est dal sistema di sovrascorrimenti noto come "Linea Olevano-Antrodoco" (Salvini & Vittori, 1982), verso Ovest sono invece delimitate dal complesso di depressioni e valli che costituiscono il Bacino Tiberino e la piana delle Acque Albule.

Il contesto idrogeologico della media valle del Fiume Aniene risulta essere fortemente influenzato dall'assetto geologico-strutturale dell'area, a sua volta condizionato dalla presenza di elementi tettonici associati al *thrust* regionale ("Linea Olevano Antrodoco"), che interpone i flysch argilloso-arenacei tra le facies di piattaforma riconducibili al dominio Laziale Abruzzese e quelle di transizione della serie Umbro-Marchigiana-Sabina.

L'assetto idrostrutturale che ne consegue determina la presenza di grandi idrostrutture carbonatiche meso-cenozoiche con circolazioni idriche regionali, i cui principali punti di recapito sono localizzati nel bacino del Fiume Aniene tra la zona di Agosta e Tivoli. Di conseguenza il fondovalle alluvionale, di spessore e ampiezza variabile in funzione dell'assetto dei depositi pre-quadernari, rappresenta un ulteriore elemento idrogeologico significativo, ospitando localmente un acquifero multifalda in relazione diretta con il Fiume Aniene e a luoghi alimentato dalle limitrofe dorsali carbonatiche.

Sul versante orientale i Monti Simbruini costituiscono, insieme agli Ernici, la grande Unità Idrogeologica dei Monti Simbruini e Ernici (riferimento C12 nella Carta Idrogeologica del Lazio alla scala 1: 250.000 - Capelli et alii, 2012) che si estende in direzione appenninica per circa 636 Km². I principali punti di recapito della circolazione carbonatica di tale idrostruttura, ubicati alla sua periferia lungo il contatto con i depositi alto-miocenici o con i termini lacustri quadernari, sono rappresentati dal grande gruppo sorgivo di Agosta (5,4 m³/s), oltre alle sorgenti dell'Alto Aniene.

La pianura alluvionale dell'Aniene nel settore tra Marano Equo ed Anticoli Corrado presenta numerose sorgenti con caratteristiche idrochimiche differenziate e con portata complessiva di 500 L/s. I depositi alluvionali dell'Aniene in località Fiumetto e Mola di Regno sono saturati in profondità dalla falda carsica regionale Simbruina con livelli piezometrici prossimi al piano campagna.

Le acque sotterranee e sorgentizie della media valle dell'Aniene hanno ovviamente natura bicarbonato-calciche sebbene con tenori di mineralizzazione diversi, legati al contributo di fluidi gassosi di origine profonda che sfruttano in risalita le discontinuità tettoniche.

Al fine di valutare le criticità per processi di frana nelle zone in cui ricadono i tracciati di progetto per il Nuovo Acquedotto Marcio, è stata verificata la presenza di movimenti franosi già catalogati nel Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) della Regione Lazio, nel

database del Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) redatto da APAT (2007) e nella Carta Inventario dei Fenomeni Franosi della Regione Lazio (Prestininzi, 2000).

Sul versante Nord in prossimità dell'abitato di Anticoli Corrado sono censite alcune frane per colamento lento, queste interessano presumibilmente le coltri superficiali frutto dell'alterazione del substrato (che in questa zona è composto essenzialmente da flysch); nella stessa zona sono presenti anche due frane, di cui una di dimensioni leggermente maggiori, con movimento complesso.

Sul versante in destra idrografica compreso tra l'abitato di Mandela e quello di Vicovaro, cioè in zona limitrofa a quella dei tracciati di progetto, sono censite alcune frane di varia tipologia (colamenti lenti, rotazionali e complesse); date le caratteristiche geologiche dell'area e delle tipologie di frana si può supporre che queste interessino i depositi, ampiamente estesi, di coltre eluvio-colluviale e piana alluvionale.

Dall'analisi della cartografia PAI illustrata al capitolo 5.1 si possono effettuare le seguenti considerazioni:

- È presente un cluster di frane con tipologia complessa e di colamento lento sul versante sotto l'abitato di Anticoli Corrado (Figura 5.1.1; Figura 5.1.4). Data la distanza del tracciato dal versante in frana e data la morfologia caratterizzata da una valle a fondo piatto che si interpone tra la condotta e i corpi franosi, si ritiene che questi non possano generare situazioni di rischio per l'opera.
- La stretta valle che da Roviano si muove in direzione Nord-Ovest presenta esclusivamente 2 frane presunte riportate nella Carta Inventario dei Fenomeni Franosi con pericolosità moderata P1 ma che non sono state identificate nel progetto Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI); essendo in questa zona l'energia del rilievo relativamente alta e gli ammassi rocciosi particolarmente fratturati, l'analisi verrà approfondita in una fase più avanzata dello studio anche mediante la predisposizione di un piano di monitoraggio (Figura 5.1.4).

Per quanto riguarda le criticità connesse con i fenomeni di esondazione, si sono consultati gli stralci del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) prodotto dall'Autorità di Bacino del Fiume Tevere inerenti alle fasce fluviali esondabili e le zone a rischio connesse al reticolo principale. La cartografia in esame suddivide il territorio in fasce fluviali; La fascia A sottintende la zona a cavallo del corso d'acqua principale (in questo caso il Fiume Aniene) potenzialmente soggetta a fenomeni di esondazione con tempi di ritorno brevi (Tr 50 anni). A questa fascia è quindi associata la pericolosità maggiore. Le fasce B e C si riferiscono a tempi di ritorno medi (Tr 200 anni) e lunghi (Tr 500 anni), quindi rispettivamente pericolosità medie e basse.

Dall'analisi di questa cartografia emergono le seguenti situazioni:

- Nel tratto in comune di partenza, più precisamente quello compreso tra Agosta e Roviano, i tracciati di progetto si trovano quasi totalmente in zona P3, quindi a pericolosità elevata, corrispondente alla Fascia A (Figura 5.2.1 e Figura 5.2.2);
- Per tutta la valle che da Roviano ha andamento prima in direzione Nord-Ovest e poi Sud-Ovest, in direzione Vicovaro, il tracciato TR2 si trova in zone limitrofe ma generalmente non comprese nelle aree perimetrate come potenzialmente affette da pericolosità idraulica (si fa eccezione per i due avvicinamenti alla valle alluvionale in corrispondenza di Roviano e del Fosso della Scarpa). Tutt'altra situazione viene invece evidenziata per il tracciato TR4 che, muovendosi principalmente all'interno della valle alluvionale del Fiume Aniene (con numerosi passaggi anche in corrispondenza dell'attuale alveo) viene caratterizzato da numerose intersezioni con aree a pericolosità elevata (P3), corrispondenti alla Fascia A (Figura 5.2.3 e Figura 5.2.4).

I fattori di pericolosità geologica di tipo puntuale sono ascrivibili principalmente a fenomeni carsici di sprofondamento (sinkhole) e, più in generale, a tutti quei processi che nel corso del tempo hanno permesso la creazione di cavità ipogee. A tal proposito è altresì importante distinguere i fenomeni di sinkhole da quelli di sprofondamenti dolinali, in quanto mentre le doline s.s. si formano in zone in cui un substrato carsificato è in affioramento o è ricoperto da una sottile coltre di sedimenti, nel caso dei sinkhole propriamente detti lo spessore delle coperture può essere anche maggiore di 100 m (Nisio & Salvati, 2004).

Più in generale, i fattori predisponenti da tenere in considerazione per definire un'area come potenzialmente soggetta a sinkhole sono i seguenti:

- lo spessore delle coperture recenti in relazione alla profondità alla quale affiora il substrato carbonatico;
- l'effettiva distribuzione di fenomeni di carsismo ipogeo in relazione al livello di stress, ossia al grado di tettonizzazione;
- le caratteristiche idrogeologiche ed idrodinamiche della falda in relazione ad un possibile circuito carsico;
- la presenza di una falda confinata in relazione all'effetto di sotto-spinta da essa indotta a fronte del carico litostatico totale soprastante;
- l'avvicinarsi del movimento verticale discendente delle acque con un flusso ascendente, nei casi in cui l'acquifero carbonatico entri in collegamento con i terreni della copertura;
- la presenza di manifestazioni idrotermali o minerali.

Per l'identificazione di possibili aree già soggette a fenomeni di dissesto carsico si è fatto riferimento al Database Nazionale Sinkhole ISPRA ed alla cartografia ufficiale della Regione Lazio (Meloni et al., 2012).

Entrambe le cartografie tematiche non riportano, nelle zone interessate dai tracciati di progetto, situazioni note di sinkhole (i più vicini si trovano nella piana di Tivoli e nella zona del comune di Marcellina, quindi a distanze considerevoli dall'opera).

Al fine di verificare potenziali fenomeni di subsidenza esistenti è stata eseguita nella Piana di Mola di Regno una specifica campagna di indagini microgravimetriche, i cui risultati sono riportati sinteticamente in Figura 5.4.7. In considerazione dei risultati ottenuti, il Tratto Comune di partenza non è ubicato in corrispondenza di aree identificate a rischio sink-hole.; ciò nonostante, nella Relazione di Monitoraggio Geotecnico e Strutturale è previsto un piano di monitoraggio con il fine di identificare eventuali aree soggette a deformazioni superficiali.

La sismicità relativa all'area della media valle del Fiume Aniene, interessata dai tracciati del Nuovo Acquedotto Marcio, è principalmente legata ai risentimenti dei terremoti prodotti dalle vicine strutture sismogeniche dell'Appennino centrale (settore aquilano/marsicano con ipocentri a distanza inferiore a 100 km), oltre che di eventuali terremoti regionali (con ipocentri a distanza maggiore 100 km).

Più localmente, entro un raggio di circa 20 km, dai cataloghi storici risulta una moderata sismicità relativa all'alta Valle dell'Aniene caratterizzata da scosse isolate o brevi crisi sismiche come quelle relative ai terremoti dell'8 settembre 1941 (Cervara di Roma) e 11 marzo 2000 (Canterano) di magnitudo massima 4.3 e risentimenti nell'area di intensità macrosismica (MCS) massima pari a 7 (Molin et al., 2002) (Pirro & Di Maro, 2002).

In base alla vigente Classificazione Sismica della Regione Lazio (Delibera di Giunta Regionale n. 387 del 22/05/2009), in recepimento dell'OPCM 3519/2006 recante i criteri generali per la definizione delle zone sismiche e i relativi valori di pericolosità sismica di base a scala nazionale, i Comuni interessati dall'area di progetto rientrano esclusivamente nella Sottozona Sismica 2B cui corrispondono i valori di accelerazione di picco orizzontale (ag), su suolo rigido (categoria A) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

Ai sensi del D.P.R. 545/2010 che definisce le linee guida per gli studi di Microzonazione Sismica del territorio della Regione Lazio, risultano pubblicati per la maggior parte dei Comuni intercettati dal tracciato del Nuovo Acquedotto Marcio, gli studi di Microzonazione Sismica di Livello 1. Attraverso quest'ultimi è possibile individuare e caratterizzare le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale e le zone soggette a instabilità, quali frane, rotture della superficie per faglie e liquefazioni dinamiche del terreno.

Dalle considerazioni di carattere geologico trattate precedentemente, dalle informazioni di carattere geomeccanico raccolte mediante rilevamento di campagna e dai dati desunti dalla campagna geognostica e geofisica effettuata, è possibile proporre l'istituzione di 4 Unità Litotecniche schematizzate nella Tabella 8.3.1.

I valori medi dei principali parametri desunti per ogni Unità Litotecnica sono riportati in Tabella 8.3.2 e Tabella 8.3.3.

Infine, per i manufatti Origine, Nodo A e per il tracciato con scavo a cielo aperto compreso tra i due manufatti è stato proposto un modello geologico-tecnico di dettaglio riportato schematizzati nelle Tabelle 8.3.4, 8.3.5 e 8.3.6.