

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

Monitoraggio di sorgenti e verifica della
potenziale interferenza idrogeologica di una
galleria: il caso della tratta stradale Grosseto-
Siena.

Candidato:

Gabriele Asticher

Relatore:

Prof. Alessandro Gargini

Sessione Luglio 2015

Anno Accademico 2014-2015

[Digitare il testo]

*..dedicata alle persone che non
svendono le loro capacità e
conoscenze al “miglior”
offerente..*

*..e un particolare ringraziamento a tutte le
persone che, in modi diversi, mi hanno
aiutato in questo percorso..che è solo
all'inizio!!!*



[Digitare il testo]

Sommario

PARTE I - INTRODUZIONE	7
Capitolo 1 - Prefazione.....	7
PARTE II - INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO	9
Capitolo 2 –Inquadramento geografico della zona	9
Capitolo 3 - Inquadramento meteo-climatico	16
Capitolo 4 - Inquadramento del progetto	20
Capitolo 5 – Inquadramento geologico	28
5.1 Formazione della catena appenninica	30
5.2 Geologia strutturale e tettonica	32
5.3 Inquadramento litologico	35
Capitolo 6 – Geologia di progetto attraversata dalle gallerie	41
6.1 La galleria “Casal di Pari”	41
6.2 La galleria “Greppoli”	44
Capitolo 7 – Inquadramento geomorfologico	45
Capitolo 8 – Inquadramento idrogeologico.....	47
Capitolo 9 – Gallerie e impatto ambientale.....	50
PARTE III – MATERIALI E METODI	53
Capitolo 10 – Monitoraggio ante-operam.....	53
Capitolo 11- Monitoraggio in corso d’opera	56
11.1 Inquadramento generale.....	56
11.2 Descrizione punti d’acqua monitoraggio in corso d’opera.....	58
Capitolo 12 - Strumentazione e metodi	70
12.1 Strumenti di campo per monitoraggio discontinuo	71
12.2 Strumenti di campo per monitoraggio in continuo	75
12.3 Calcolo portata e stramazzi	77
Capitolo 13 – Dati pregressi.....	81

[Digitare il testo]

PARTE IV – PRESENTAZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI.....	87
Capitolo 14 – Presentazione dei dati del monitoraggio <i>ante-operam</i>	87
Capitolo 15 – Presentazione ed elaborazione dati dei punti d’acqua monitorati in corso d’opera.....	90
15.1 Sorgenti monitorate in discontinuo.....	92
15.2 Elaborazione dati sorgenti monitorate in corso d’opera.....	96
15.3 Elaborazione dati piezometri.....	104
Capitolo 16 - Classificazione delle sorgenti in base ai loro sistemi di flusso alimentanti.....	124
Capitolo 17 – Conclusioni	129
BIBLIOGRAFIA	136

PARTE I - INTRODUZIONE

Capitolo 1 - Prefazione

Questo studio è stato sviluppato attraverso il monitoraggio idrogeologico di sorgenti e piezometri al fine di individuare il rischio di eventuali influenze causate dai lavori di ampliamento a 4 corsie di un tratto della S.S. 223 di Paganico (tratta Grosseto – Siena) che prevede la costruzione di nuovi tratti di galleria ubicati nell'area. ANAS ha elaborato il progetto di ampliamento a quattro corsie della S.S. 223 ritenendo necessario migliorare le condizioni di un'arteria particolarmente importante per la regione Toscana al fine di ridurre i tempi di percorrenza e migliorare la sicurezza lungo l'itinerario Grosseto-Siena.

Il tratto di interesse per la presente tesi va dal km 30+040 al km 41+600 della tratta Siena-Grosseto, corrispondente ai lotti 5, 6, 7 e 8. I lavori riguardano i comuni di Monticiano (provincia di Siena) e Civitella Paganico (provincia di Grosseto), lungo la valle del Fiume Merse in un'area ad elevato pregio ambientale presso la confluenza con il Torrente Farma; essi prevedono la costruzione o l'adeguamento di 4 svincoli, 14 viadotti (8 da adeguare e 6 da realizzare ex novo), e la costruzione di 3 gallerie naturali, per una lunghezza complessiva di 2.5 km, e 7 gallerie artificiali. Le attività di cantiere nel tratto interessato sono iniziate nel Dicembre 2013; si stima che le opere saranno completate per Luglio 2015. L'area è situata nella Toscana Sud-Occidentale dove i rilievi della dorsale medio-toscana sono composti dalle formazioni del Basamento Metamorfico della Serie Toscana, dai brandelli della Serie Toscana ridotta (Calcere Cavernoso) e dalle Unità Liguridi avanscorse.

Il lavoro di tesi sul campo è stato svolto con il supporto tecnico della società di consulenza geo-ingegneristica di Bologna *Studio Mattioli s.r.l.* la quale ha ricevuto l'incarico del monitoraggio idrogeologico dal *Gruppo Strabag* che si occupa di costruzione di grandi infrastrutture.

[Digitare il testo]

Il lavoro sul campo è consistito in un'attività di monitoraggio idrogeologico, anche tramite sensori in continuo, per più di 1 anno idrologico (novembre 2013- Gennaio 2015), su sorgenti e piezometri captanti acque sia fredde che termali.

Il monitoraggio è stato basato sia su un approccio in discontinuo che in continuo. Il monitoraggio in continuo, quello di maggior significato in termini idrogeologici, ha riguardato 2 sorgenti e 7 piezometri.

Le sorgenti sono rappresentate da: sorgente termale “*Le Caldanelle di Petriolo*” (per la quale è stato domandato permesso di ricerca nell'anno 2013) e la sorgente fredda “*Porcareccia*” sfruttata per uso idropotabile da *Petriolo S.p.a. Resort*. I 7 piezometri sono situati nell'area Caldanelle e sono stati perforati da *HERA S.r.l.* nel Giugno 2010 al fine di caratterizzare meglio il sistema idrogeologico. I punti di monitoraggio sono situati presso la località dei Bagni di Petriolo a cavallo tra la provincia di Siena e di Grosseto.

I dati relativi alle sorgenti raccolti mensilmente sono la portata ed i parametri fisico-chimici *in situ*. Per i 7 piezometri i dati raccolti mensilmente sono il livello piezometrico ed i medesimi dati fisico-chimici raccolti per le sorgenti.

Nell'elaborazione del modello idrogeologico concettuale sono anche stati considerati i dati raccolti per un monitoraggio in discontinuo effettuato su un totale di 6 sorgenti, nel periodo da Luglio 2012 a Ottobre 2014 dalla società *AMBIENTE S.C. Ambiente ingegneria ambientale e laboratori* per conto del *Gruppo Strabag*. Le misure rilasciateci dal *Gruppo Strabag* hanno riguardato la portata.

I dati raccolti sono serviti a formulare il modello idrogeologico concettuale del sito ed a valutare le potenzialità d'interferenza idrogeologica delle gallerie sul sistema idrico sotterraneo.

PARTE II - INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO

Capitolo 2 –Inquadramento geografico della zona



Fig.2.1 – Carta geografica della Toscana con evidenziata la zona di studio ubicata al confine tra le province di Siena e Grosseto.

La zona oggetto di studio si trova nella regione Toscana, al confine fra le province di Siena e Grosseto (Fig.2.1), compresa tra i comuni di Civitella Paganico (GR) e Monticiano (SI), presso le frazioni di Casal di Pari, Pari e la località dei Bagni di Petriolo. Quest’area, che rientra nel bacino idrografico del Fiume Ombrone, è di grande importanza ambientale, caratterizzata da un paesaggio da montano a collinare, con una rigogliosa vegetazione boschiva e una bassa densità abitativa concentrata nelle aree rurali dove l’attività principale è l’agricoltura.

[Digitare il testo]

Dal punto di vista del reticolo fluviale nell'area il corso d'acqua principale è il Torrente Farma il quale ha origine alle pendici del Poggio Porrone sulle Colline Metallifere nei pressi di Meleta di Roccatederighi a quota 475 m s.l.m. L'asta fluviale misura 35 km e si sviluppa in vallette piuttosto ampie dove riceve le affluenze dei Rii Farmicciola, Farmulla e Bardellone. Nel tratto interessato dal cantiere il Torrente Farma incide profondamente la valle entro cui si snoda caratterizzata da forti pendii. Infine confluisce nel Fiume Merse. Quest'ultimo nasce dalle sorgenti posizionate sulle propaggini orientali delle Colline Metallifere a quota 848 m s.l.m. tra Poggio Croce di Prata e Poggio di Montieri. La sua asta fluviale è di 70 km che percorre tra le province di Grosseto e Siena fino a sfociare nel Fiume Ombrone attraversando l'area a sud del Massiccio della Montagnola Senese (Fig.2.2). Il Fiume Merse nel punto della confluenza con il Torrente Farma si trova a una distanza dall'area di studio di 5 km. Abbiamo poi il "Fosso Caldanelle" che scorre in direzione S-N a sinistra del tracciato stradale e si immette nel Torrente Farma dopo che quest'ultimo ha oltrepassato il viadotto omonimo. Lungo il suo alveo c'è il punto d'emergenza della sorgente "*Le Caldanelle di Petriolo*" circa all'altezza del *Petriolo S.p.a. Resort*. Il "Fosso delle Caldanelle" percorre una piccola valle molto incisa e con versanti ripidi, infatti è caratterizzato da cambi di portata anche importanti in occasione di intense precipitazioni. Il "Fosso della Rilucia" invece scorre in direzione N-S (Fig.2.4) seguendo un percorso sub-parallelo al tracciato stradale per poi confluire nel Torrente Lanzo.

[Digitare il testo]

	TRATTO NUOVA GALLERIA
	RETICOLO IDROGRAFICO
	SORGENTI
	BACINO IDROGRAFICO TORRENTE FARMA
	BACINO IDROGRAFICO FOSSO DELLA RILUCIA
	BACINO IDROGRAFICO FOSSO VELENOSO
	BACINO IDROGRAFICO BOTRO DELLA BUFALA
	BACINO IDROGRAFICO FOSSO "RAMO RILUCIA"
	BACINO IDROGRAFICO FOSSO DEL FONTANINO
	BACINO IDROGRAFICO TORRENTE LANZO
	SOTTOBACINO IDROGRAFICO FOSSO DELLA RILUCIA

Fig.2.3 – Legenda carta corografica dei bacini idrografici dell'area di studio con progetto.

[Digitare il testo]

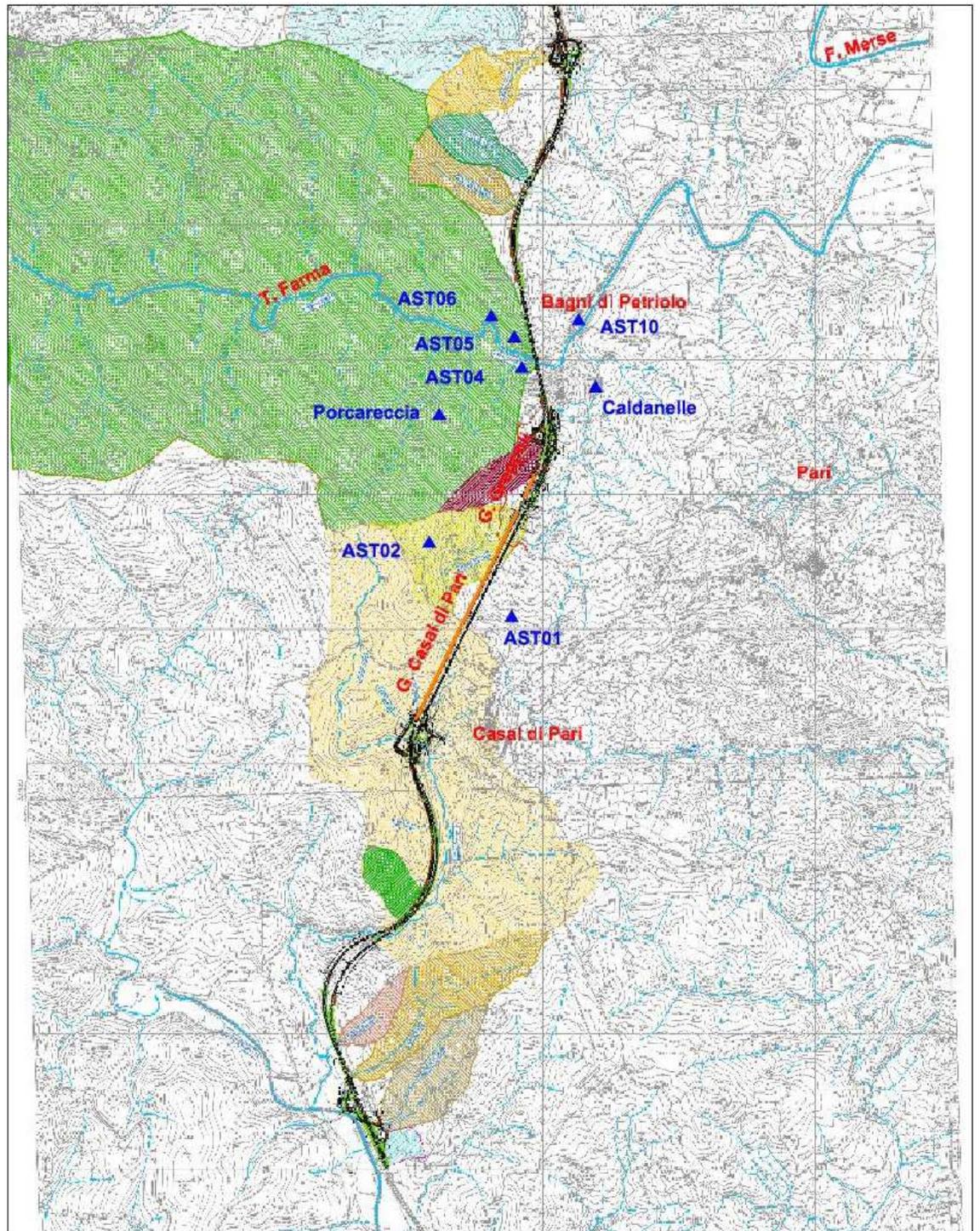


Fig.2.4 – Carta corografica dei bacini idrografici dell’area di studio in SCALA 1 : 50.000, in evidenza le gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli”, il F. Merse e il T. Farma, le località della zona e le sorgenti.

[Digitare il testo]

Ci sono due riserve naturali nell'area (Fig.2.5): la Riserva Naturale Farma, che si estende nel tratto mediano della vallata percorsa dal Torrente Farma e sulla porzione alta del Torrente Lanzo, e la Riserva Naturale del Basso Merse che occupa l'area lungo il Fiume Merse. Tutta la Val di Farma, ed in particolar modo il tratto compreso nella riserva, conserva aspetti naturalisti unici per la provincia di Siena e tra i più interessanti dell'intera penisola italiana, con presenza di una peculiare vegetazione e di specie animali rare ed endemiche, che qui trovano un ambiente ancora selvaggio e non disturbato dalle attività umane. La peculiare conformazione della vallata è all'origine di un vistoso fenomeno di inversione termica, che è alla base delle particolari condizioni microclimatiche che caratterizzano il fondovalle, colonizzato dal faggio, dall'acero di monte e persino dalla betulla, piante tipiche d'altitudini maggiori (Mattiolo, 2012).



Fig.2.5 – Riserve naturali del Farma, dell'Alto Merse e del Basso Merse, in rosso è ubicata l'area di studio.

[Digitare il testo]

I dati consultati riguardo la cartografia sono stati scaricati per la scala 1:100.000 dal sito sgi.isprambiente.it:

- Foglio 120 Siena;
- Foglio 128 Grosseto.

Per la cartografia regionale a scala 1:10.000 dal sito www502.regione.toscana.it:

- Sezione 307120.

Quest'area è rappresentata nelle seguenti Carte Tecniche della Regione Toscana:

- Foglio 120: toponimo "Siena" - scala 1:100.000;
- Tavoleta 120 II SO: toponimo "Casal di Pari" - scala 1:25.000;
- Sezione 307120: toponimo "Pari" – scala 1:10.000;
- Sezione 307160: toponimo "Fercole" – scala 1:10.000.

[Digitare il testo]

Capitolo 3 - Inquadramento meteo-climatico

Al fine di valutare l'impatto idrogeologico dei lavori relativi all'ampliamento della carreggiata della S.S. 223 Paganico, e in particolare della costruzione della galleria, è importante conoscere il regime climatico dell'area e quindi possedere una conoscenza delle condizioni pluviometriche e termiche della zona in modo da poter individuare eventuali anomalie che influenzino l'interpretazione dei dati. Questo è oggetto del monitoraggio termo-pluviometrico in corso d'opera che sarà descritto in dettaglio più avanti.

I risultati di detto monitoraggio vanno comunque confrontati con il regime climatico dell'area, utile anche a definire l'anno idrogeologico, ossia il periodo compreso tra l'inizio della ricarica e la fine della stagione arida estiva che termina con il periodo noto come "recessione estiva", in cui i livelli piezometrici si abbassano e le sorgenti entrano in magra. Secondo la classificazione climatica di Köppen (1936) l'area è classificata nella fascia "C_{sa}" ossia: "*clima temperato umido con estate asciutta/molto calda è temperatura media del mese più caldo superiore a 22 °C*".

Di fatto si tratta del clima sub-tropicale ad estate asciutta o *mediterraneo*, anche se con influenza montana continentale.

Nel grafico in Fig.3.1 viene rappresentata la temperatura media mensile in gradi °C per ogni mese negli ultimi 30 anni ossia relativa al periodo 1985 – 2014. I dati provengono dal sito meteorologico "*ilmeteo*" e sono relativi alla stazione di Civitella Paganico (GR) a quota 329 m s.l.m..

[Digitare il testo]

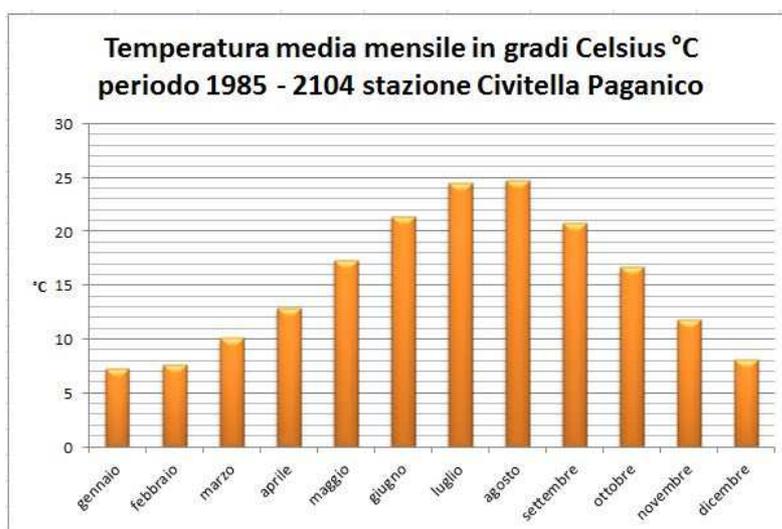


Fig.3.1 – Grafico della temperatura media mensile in gradi Celsius °C del periodo 1985 – 2014 relativo alla stazione di Civitella Paganico (GR).

Nel grafico della Fig.3.2 viene rappresentata la precipitazione media mensile per ogni mese negli ultimi 30 anni ossia relativa al periodo 1985 – 2014. I dati provengono dal sito del SIR Servizio Idrologico Regionale della Toscana. In particolare stiamo facendo riferimento alla stazione di Pari [TOS10002790] - Civitella Paganico (GR) a quota 365.95 m s.l.m. per il periodo 1984 – 2001 e alla stazione di Pari [ID: TOS03002789] - Civitella Paganico (GR) che si trova a una quota di 330 m s.l.m. per il periodo 2002 – 2014.

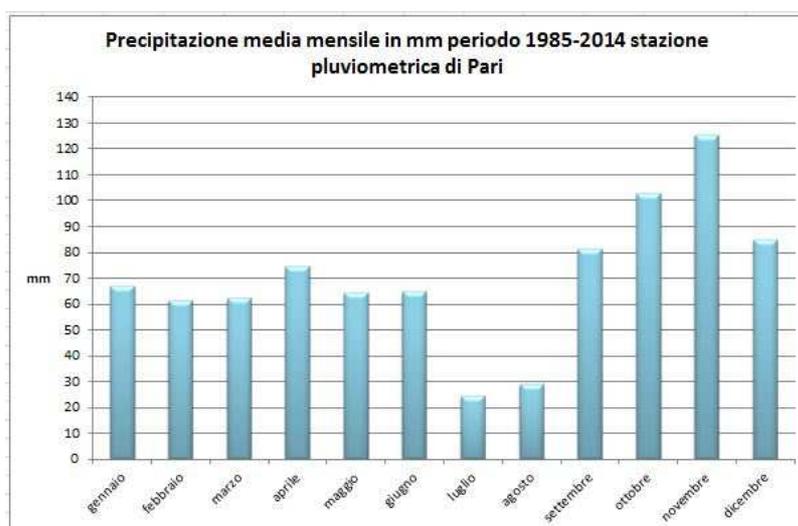


Fig.3.2 – Grafico della precipitazione media mensile in mm del periodo 1985 – 2014 relativo alla stazione pluviometrica di Pari (GR).

[Digitare il testo]

Nei grafici successivi di Fig.2.8 e Fig.2.9 viene rappresentata la precipitazione annua relativa agli anni 2013 e 2014, cioè il periodo in cui sono stati svolti i lavori di cantiere nell'area di studio per permettere un confronto veloce sull'andamento delle precipitazioni rispetto agli ultimi 30 anni. I dati sono relativi alla stazione di Pari [ID: TOS03002789] - Civitella Paganico (GR) che si trova a una quota di 330 m s.l.m. e sono stati scaricati dal sito SIR della Toscana.

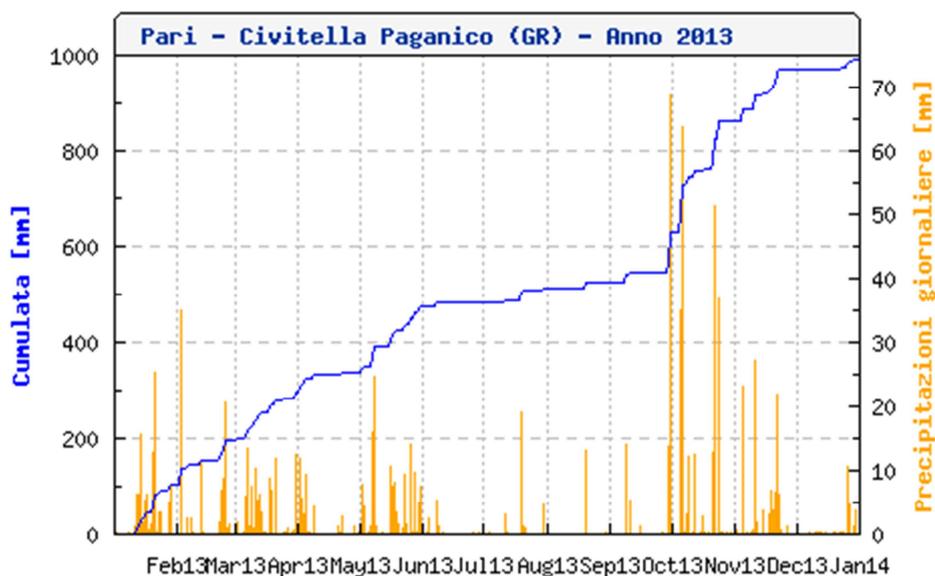


Fig.3.3 - Istogramma delle precipitazioni giornaliere dell'anno 2013 assieme alla cumulata, relativo alla stazione pluviometrica di Pari-Civitella Paganico.

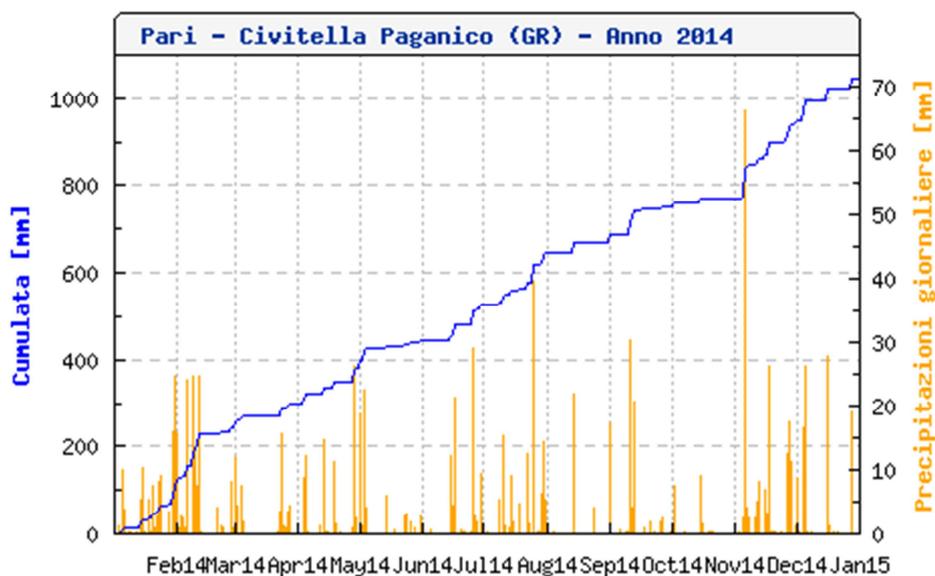


Fig.3.4 - Istogramma delle precipitazioni giornaliere dell'anno 2014, assieme alla cumulata, relativo alla stazione pluviometrica di Pari-Civitella Paganico.

[Digitare il testo]

Dai grafici relativi alle precipitazioni medie mensili, in linea di massima, si può affermare che si ha il periodo di ricarica, ossia il picco delle precipitazioni, in due sessioni, quella principale in autunno (Novembre) e una secondaria in primavera (Aprile) mentre la fase di recessione idrologica è nel periodo estivo (Luglio-Agosto).

Per quanto riguarda la temperatura media annua del periodo 1985–2014 è di 15.3 C° che, confrontata con la temperatura media degli anni 2013 e 2014, risulta inferiore di circa un'unità, dato che si hanno 16.11 nel 2013 e 16.42 nel 2014.

Analizzando i dati nel loro complesso si può evidenziare che la precipitazione media annua nell'area, riferita al periodo 1985–2014, è di 839.31 mm, la massima, registra nel 1987, è di 1204 mm e la minima registrata nel 2002, è di 453 mm. Confrontando questi dati con quelli relativi al 2013 e al 2014, il periodo interessato dai lavori e quindi dall'osservazione d'eventuali interferenze sul sistema acquifero, si può affermare che la piovosità totale del periodo di cantierizzazione è in entrambi i casi leggermente superiore alla media annua del trentennio preso in esame con valori rispettivamente di 993.6 mm per il 2013 e di 1042.8 mm per il 2014.

[Digitare il testo]

Capitolo 4 - Inquadramento del progetto

Il progetto d'ampliamento della carreggiata a 4 corsie della S.S. 223 di Paganico, redatto da ANAS (Azienda Nazionale Autonoma delle strade Statali) per migliorare la viabilità del tratto Grosseto-Siena, è stato affidato al gruppo di costruzioni austriaco *STRABAG*. *STRABAG* per l'esecuzione del monitoraggio *ante-operam*, relativo alle acque superficiali e sotterranee, si è affidata ai servizi dello *Studio Mattioli s.r.l.*

Il progetto prevede il passaggio dalle attuali due corsie a quattro corsie con carreggiate separate, per una larghezza complessiva della piattaforma stradale di circa 23 metri. Gli interventi si svolgeranno in due macrofasi. La prima macrofase prevede la realizzazione della nuova carreggiata, affiancata all'attuale sede stradale in esercizio. La seconda macrofase prevede lo spostamento dei flussi di traffico sulla nuova carreggiata realizzata e l'ammodernamento della vecchia sede.

Il progetto si suddivide in 6 tratte all'interno dei lotti. Esso prevede la costruzione di diverse tipologie di opere.

Per quanto riguarda la tipologia delle opere di sostegno esse sono previste in corrispondenza degli scavi con altezze maggiori di 4-5 m e si differenziano in:

- Muri in calcestruzzo;
- Paratie di pali;
- Paratie di micropali.

Le differenti opere di sostegno saranno impiegate a seconda dell'altezza dello scavo e delle caratteristiche del materiale interessato. Le opere principali relative alle 6 tratte vengono illustrate brevemente di seguito.

Partendo dall'area sud del cantiere (Fig.4.1), progressiva chilometrica (Pk) Pk 0+000 alla progressiva Pk 1+860 si ha la tratta che va da inizio lotto all'imbocco nord della galleria di "Poggio Terriccio". In questa tratta l'opera principale in stato di costruzione è la carreggiata est della galleria di "Poggio Terriccio" la quale si sviluppa dalla progressiva Pk 1+380 alla progressiva Pk 1+860.

[Digitare il testo]

Dalla progressiva Pk 1+860 progressiva alla Pk 5+510 c'è la tratta compresa tra l'imbocco nord della galleria di "Poggio Terriccio" e l'imbocco nord della galleria di "Casal di Pari". In questa tratta il progetto prevede la costruzione di 3 gallerie artificiali sulla carreggiata ovest (Fig.4.1). e la costruzione, in fase svolgimento della carreggiata ovest, della galleria naturale di "Casal di Pari" (Fig.4.2).

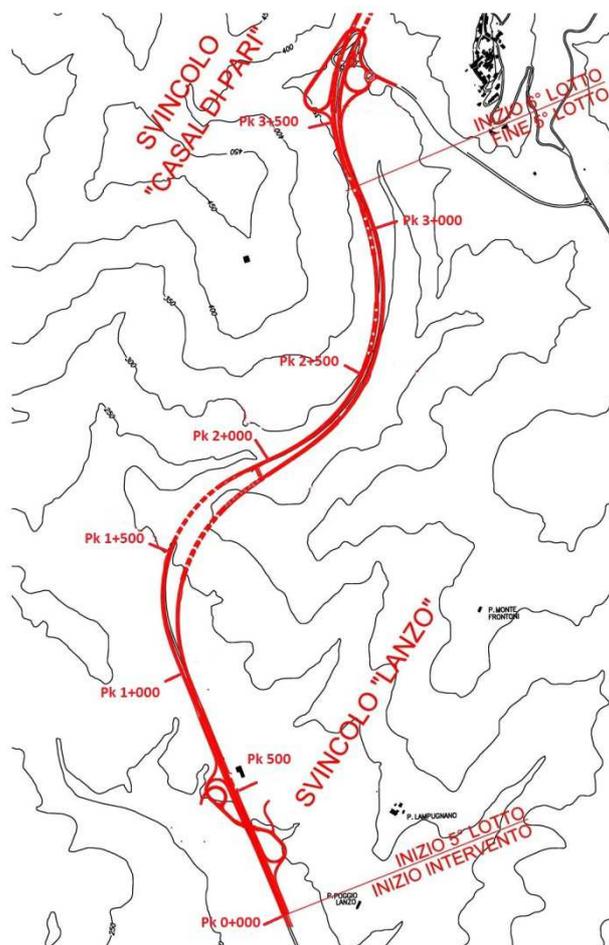


Fig.4.1- In rosso progetto di cantiere da progressiva (Pk) 0.000 a (Pk) 3+500.

La galleria artificiale n.1 si sviluppa dalla progressiva Pk 2+256 alla progressiva Pk 2+784, la galleria artificiale n.2 invece dalla progressiva Pk progressiva 2+969 alla progressiva Pk 3+149 e la galleria artificiale n.3 dalla progressiva Pk 3+208 alla progressiva Pk 3+300. La canna ovest della galleria naturale si estende dalla progressiva Pk 3+810 alla progressiva Pk 5+510. La tratta successiva va dall'imbocco nord della galleria "Casal di Pari" al viadotto Farma ossia dalla progressiva Pk 5+510 alla progressiva Pk 7+191.

[Digitare il testo]

All'interno di questa tratta abbiamo una sola galleria in progetto sulla carreggiata ovest: la galleria "Greppoli" con inizio alla progressiva Pk 5+638 e fine alla Pk progressiva 5+811 (Fig.4.2).

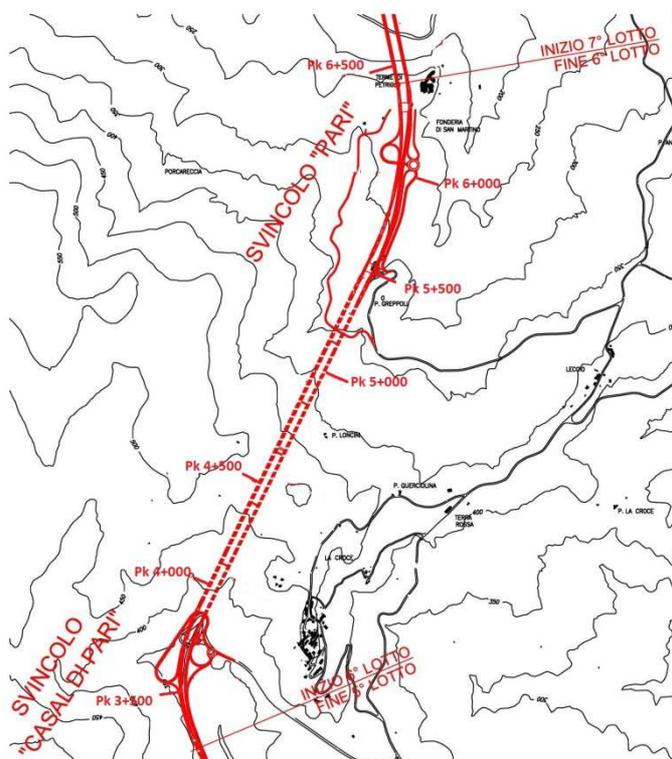


Fig.4.2- In rosso progetto di cantiere da progressiva (Pk) 3+500 a (Pk) 6+500.

L'opera di maggior rilievo è il viadotto Farma che attraversa la profonda incisione del torrente omonimo ed è fondato su pozzi di notevole diametro spinti in profondità. Questo viadotto sostituirà completamente il viadotto preesistente di cui è prevista la demolizione.

Tra il viadotto Farma e il viadotto Monti c'è la tratta successiva che è compresa tra la progressiva Pk 7+191 e la progressiva Pk 8+551 (Fig.4.3). Le opere progettate in questa tratta sono 2 gallerie artificiali che occuperanno la carreggiata ovest: la galleria artificiale n.4 dalla progressiva Pk 7+443 alla progressiva Pk 7+558 e la galleria artificiale n.7 dalla progressiva Pk 8+210 alla progressiva Pk 8+321. Il viadotto Monti è già esistente ed è in fase di esecuzione, la carreggiata ovest che si svilupperà dalla progressiva Pk 8+418 alla progressiva Pk 8+551.

[Digitare il testo]

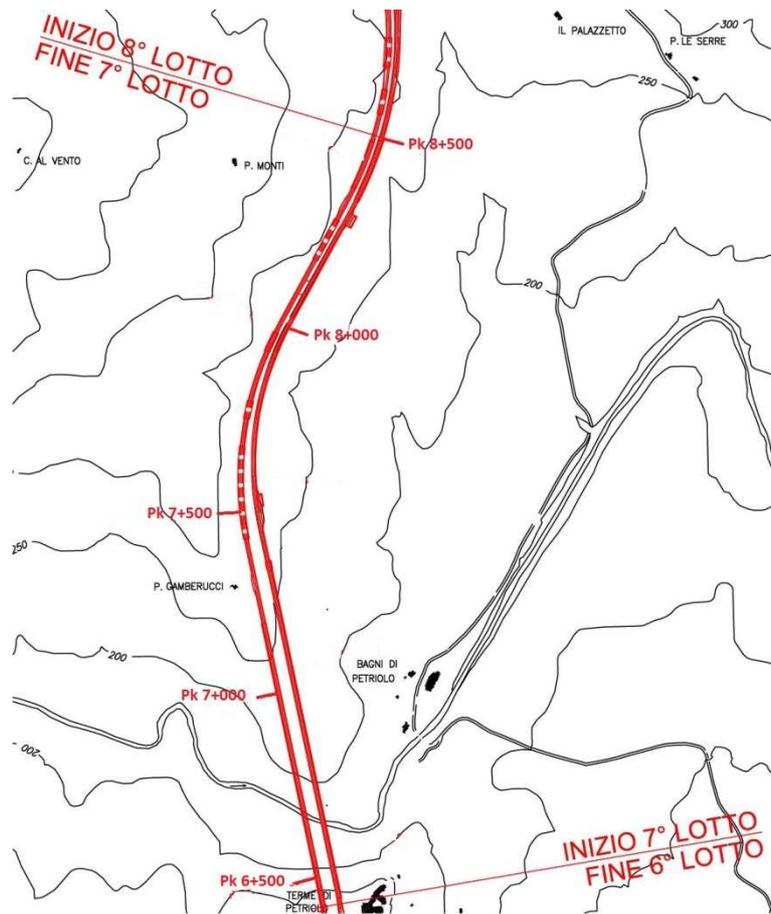


Fig.4.3- In rosso progetto di cantiere da progressiva (Pk) 6+500 a (Pk) 8+500.

La tratta che segue va dal viadotto Monti, e quindi dalla progressiva Pk 8+551, e termina alla progressiva Pk 9+450 con il viadotto Potatine. Qua è prevista la costruzione di 2 gallerie artificiali, la n.8 e la n.9, entrambe in carreggiata ovest. La n.8 va dalla progressiva Pk 8+627 alla progressiva Pk 8+694 e la n.9 inizia alla progressiva Pk 8+756 e termina alla progressiva Pk 8+834. Il viadotto delle Potatine si estende dalla progressiva Pk 10+019 alla progressiva Pk 10+252.

Nell'ultima tratta tra il viadotto Potatine e la fine lotto non sono previste opere particolari (Fig.4.4).

[Digitare il testo]

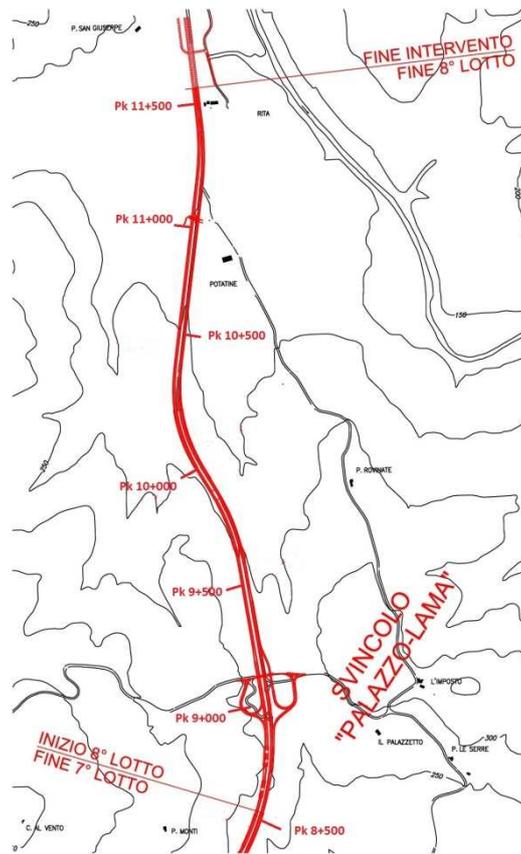


Fig.4.4- In rosso progetto di cantiere da progressiva (Pk) 8+500 a (Pk) 11+500.

Nella carta riportata in Fig.4.6, estratto della carta geologica regionale SEZIONE 307120 rielaborata con il programma “Autocad”, si può vedere l’ubicazione del progetto delle due gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli” che sono le uniche opere che possono presentare un potenziale di interferenza idrogeologica. In Fig.4.5 è riportata la legenda.

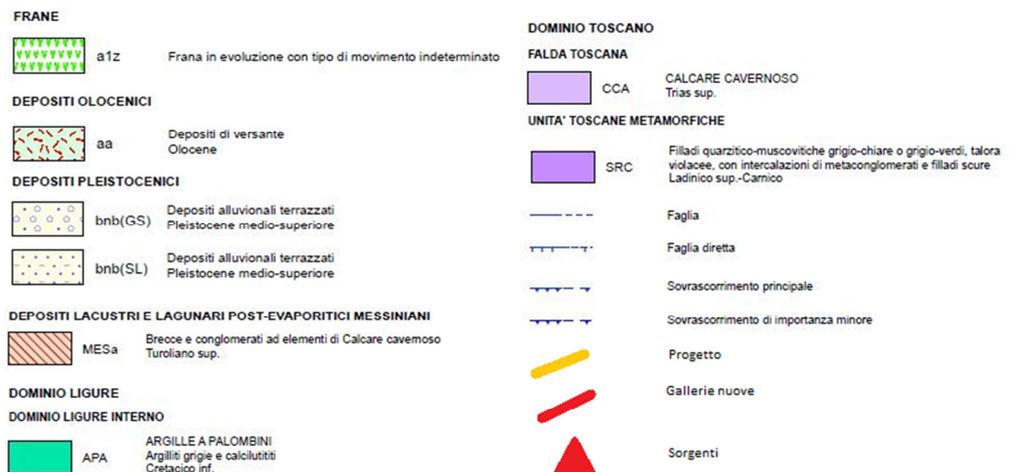


Fig.4.5 – Legenda estratto carta geologica SEZIONE 307120.

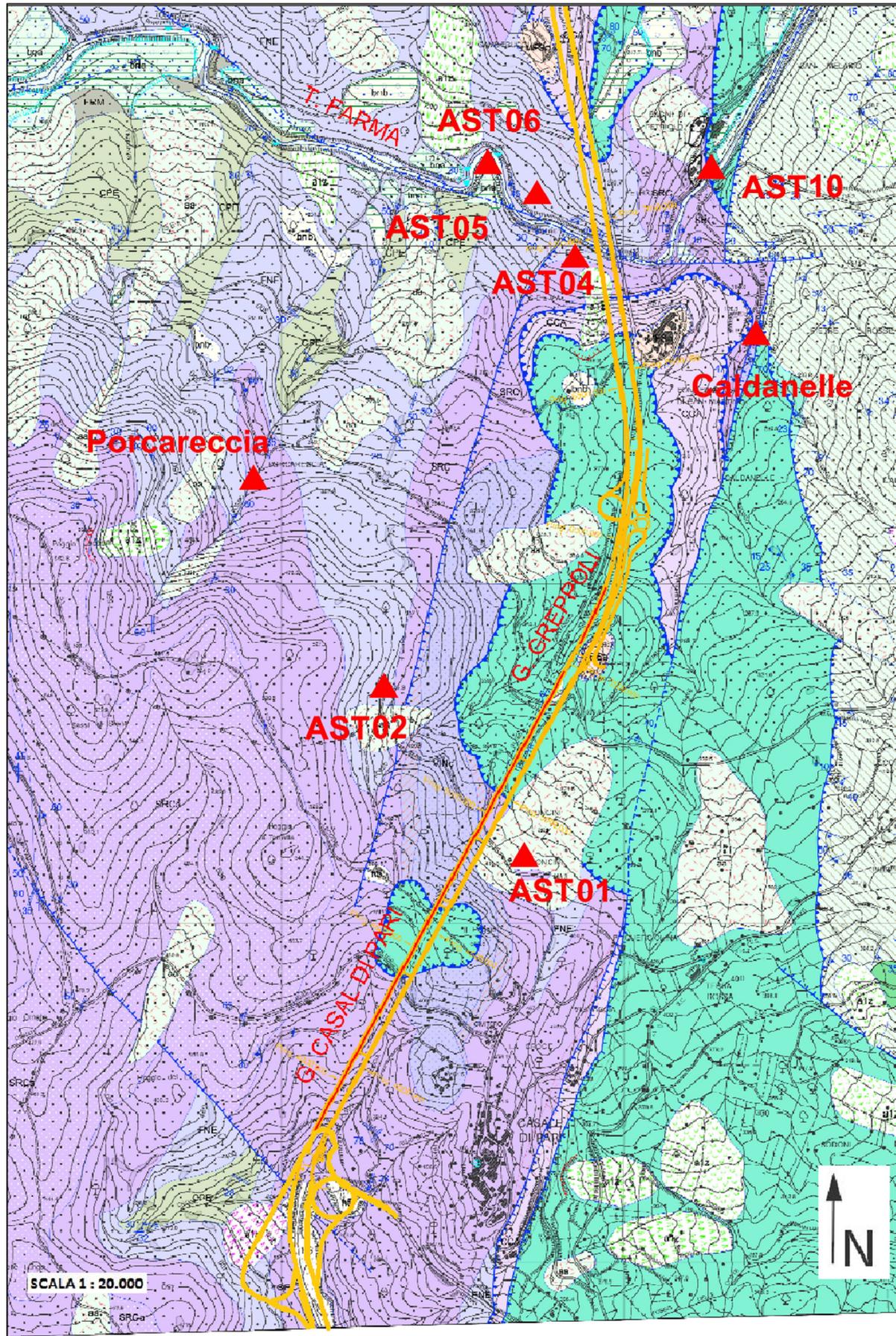


Fig.4.6 - Estratto carta geologica regionale SEZIONE 307120, SCALA 1:20.000 con progetto e ubicazione gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli”.

[Digitare il testo]

Nel complesso le opere che potenzialmente risultano di maggior impatto rispetto alle risorse idriche sotterranee sono le gallerie naturali, ossia in questo caso: le gallerie “Poggio Terriccio”, “Casal di Pari” e la “Greppoli”. In questo studio verranno esaminate le gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli”.

L’area del progetto interessata dalla costruzione delle 2 gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli” si estende dalla progressiva Pk 3+810, imbocco sud “Casal di Pari”, alla progressiva Pk 5+811, imbocco nord “Greppoli”.

Per quanto riguarda l’identificazione plano-altimetrica del tracciato la quota di progetto della galleria “Casal di Pari” all’imbocco sud corrisponde a 346 m s.l.m. e all’imbocco nord a 309 m s.l.m. La galleria “Greppoli”, lungo il suo profilo, sviluppa la quota di progetto da 300 m s.l.m. imbocco sud a 290 m s.l.m. imbocco nord.

Per quanto riguarda la galleria di “Casal di Pari” (Fig.4.7), la quale si estende per una lunghezza totale di 1,7 km, i lavori di scavo sono cominciati per l’imbocco nord (progressiva Pk 5+510) a Maggio 2014, e per l’imbocco sud (progressiva Pk 3+810) a fine Agosto 2014. Il suo scavo è relativo alla canna ovest essendo la canna est già esistente. Al momento gli scavi, eseguiti con la tecnica “a martellone”, hanno raggiunto i 300 m di perforazione circa da entrambi gli imbocchi senza incontrare particolari venute d’acqua.



Fig.4.7-Imbocco nord Pk 5+510 galleria “Casal di Pari”. Foto del 12/11/2014.

[Digitare il testo]

La galleria “Greppoli” (Fig.4.8) si sviluppa dalla progressiva Pk 5+638 (imbocco sud) alla progressiva Pk 5+811 (imbocco nord) per un totale di 173 m. I lavori per la sua costruzione sono cominciati a Dicembre 2013 dall’imbocco sud (progressiva Pk 5+638) e sono terminati ad Aprile 2014.



Fig.4.8-Vista dell’imbocco sud, Pk 5+638, della galleria “Greppoli” sullo sfondo della valle del Farma e dell’imbocco nord, Pk 5+510, costituito da un tratto di galleria artificiale, della galleria “Casal di Pari” in primo piano. Foto del 06/11/2014.

Capitolo 5 – Inquadramento geologico

L'area interessata dal progetto si trova, da un punto di vista geologico, in quella che è chiamata "Toscana Meridionale" e taglia, con direzione nord-sud, la Dorsale Pre-Appenninica Medio Toscana. Tale dorsale è composta dalle formazioni del Basamento Metamorfico della Serie Toscana, dalla base evaporitica della Serie Toscana Medesima (Serie Toscana ridotta) e dalle Unità Liguridi.

La Dorsale Medio Toscana è arcuata e convessa ad oriente e si allinea morfologicamente lungo la direttrice Rosia-Monticiano-Roccastrada-Montepescali (Fig.5.1 legenda e Fig.5.2 estratto carta); essa è composta principalmente dalla formazione del Verrucano (Basamento Metamorfico) su cui poggiano lenti di Calcare Cavernoso (Serie Toscana ridotta), di fatto scaglie tettoniche avanscorse sul basamento.

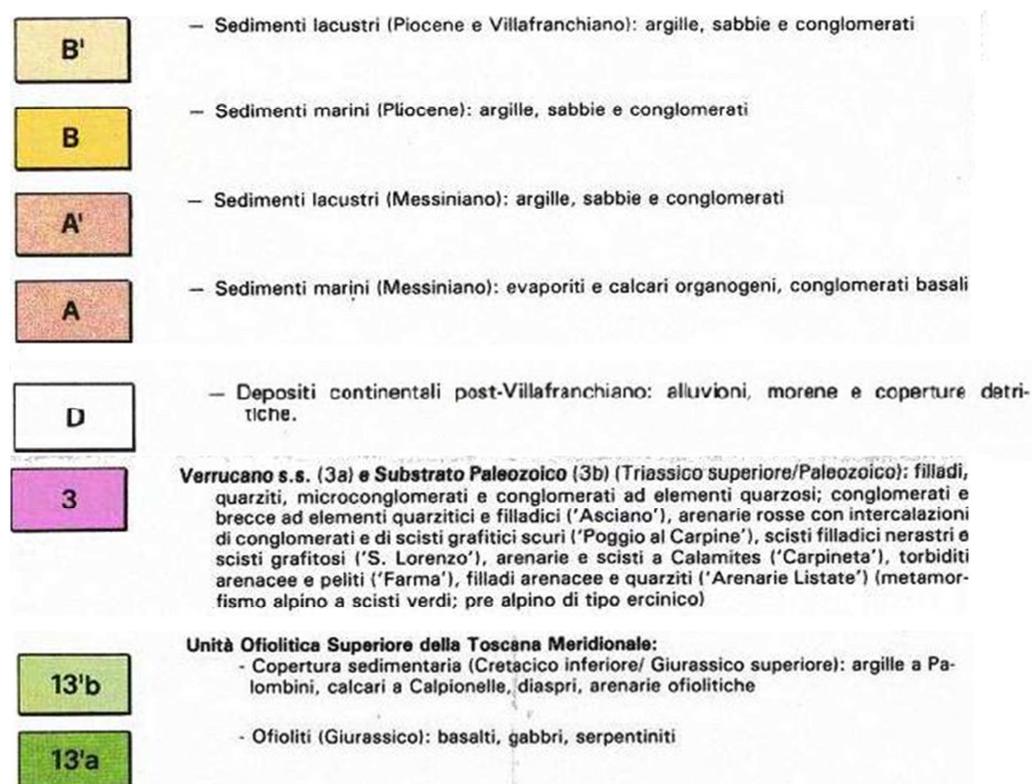


Fig.5.1 – Legenda estratto della carta strutturale dell'Appennino Settentrionale (da CNR 1982).

[Digitare il testo]

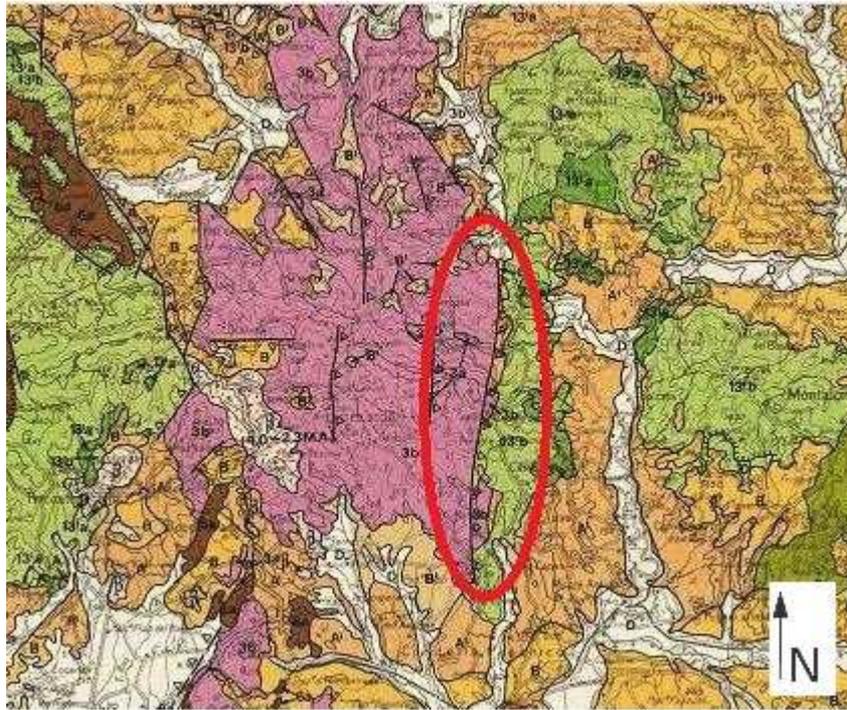


Fig. 3.2 – Estratto della carta strutturale dell'Appennino Settentrionale (da CNR) con la direttrice Rosia-Monticiano-Roccastrada-Montepescali evidenziata. La legenda è riportata in Fig.3.1.

Ai fianchi della Dorsale Medio Toscana si trovano su entrambi i lati due gruppi: un gruppo calcareo-arenaceo-marnoso-argilloso, denominato “Complesso Flyschioide Ofiolitifero Alloctono” (appartenente alle Unità Liguridi interne, color verde chiaro), avanscorso tettonicamente come falda di ricoprimento sulla dorsale medio toscana, e un gruppo neogenico autoctono post-orogenico costituito da argille, sabbie gialle, ghiaie, conglomerati e gesso (color arancio). Il gruppo Neogenico è distribuito principalmente nell'area lungo il letto del Fiume Merse in località Chiusdino (SI) e nella piana alluvionale del Fiume Ombrone di cui il Fiume Merse è affluente.

[Digitare il testo]

5.1 Formazione della catena appenninica

L'evoluzione geodinamica che ha avuto luogo nell'area mediterranea dalla fine del periodo Triassico (251-200 Ma b.p.) ha portato, fra le altre, alla formazione dell'attuale catena dell'Appennino Settentrionale e delle regioni ad essa circostanti.

Il processo che ha visto la formazione dell'area appenninica è stato il risultato dell'interazione tra la placca Europea e quella Africana, tra le quali era presente una fascia crostale meno rigida formata da 2 placche minori: verso l'Europa vi era Iberia, che coincide con l'attuale Spagna e di cui il massiccio Sardo-Corso era una propaggine, mentre verso l'Africa vi era Adria, che oggi costituisce il basamento crostale della penisola italiana e dell'Adriatico.

Una prima fase, a regime distensivo, è relativa al Giurassico medio-superiore quando l'apertura dell'Atlantico Centrale provoca lo spostamento della placca Africana verso ESE, con una migrazione che perdurerà fino al Cretaceo superiore. A seguito di tale fase si viene a formare, tra la placca Europea-Iberia e placca Africana-Adria, un bacino su crosta oceanica che prende il nome di Oceano Ligure-Piemontese.

Successivamente, a partire dal Cretaceo superiore, per l'apertura dell'Atlantico Settentrionale, la placca Africana cambia verso di migrazione, da ESE a NNE, entrando in convergenza con l'Europa.

Questo processo provoca la chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese e la conseguente formazione di un prisma d'accrezione, per la subduzione sud vergente della litosfera oceanica al di sotto della placca africana, costituito dall'impilamento di scaglie di crosta oceanica, sedimenti di fossa e pelagiti abissali, appartenenti alla placca sotto-scorrente (parte più interna delle successive Unità Liguri).

Quando, a seguito del processo di subsidenza, termina la crosta oceanica, con la chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese, ha inizio una fase di collisione continentale (a partire dall'Eocene sup.) detta "fase di subduzione ensialica" con la collisione diretta tra la placca Europea e Adria.

[Digitare il testo]

Da questo processo avremo la formazione di una protocatena appenninica tramite la formazione di cunei listrici embricati (sequenza *piggy-back*) che comportano l'ispessimento della crosta continentale.

Il sistema orogenico appenninico vero e proprio si sviluppa a partire dall'Oligocene superiore (Boccaletti et alii, 1990), quando avviene l'apertura del Bacino Ligure-Balearico, connessa alla rotazione del Blocco Sardo-Corso che si distacca dall'Iberia-Europa (Boccaletti et alii, 1982): la rotazione legata a questi eventi determina una serie di accavallamenti e piegamenti in direzione NE, traslando gradualmente la paleocatena appenninica nella stessa direzione. Successivamente si ha lo sviluppo di processi estensionali nell'area tirrenica (Miocene-Pliocene), più marcati nel settore meridionale, con frammentazione della catena *eo-mesoalpina* e apertura del Mar Tirreno e del processo denominato "roll back" ossia la retrorotazione della crosta Adria in subduzione verso ovest al di sotto della catena Appenninica. La migrazione verso est delle strutture compressive adriatiche, sul versante tirrenico si accompagna all'innescio di lacerazioni crostali che frammentano la struttura a falde dando luogo alla formazione di depressioni tettoniche (Gelati, 2013).

L'area di studio, evidenziata con un pallino blu nella Fig.5.3, viene quindi a trovarsi all'interno della zona di distensione tirrenica post-orogena.

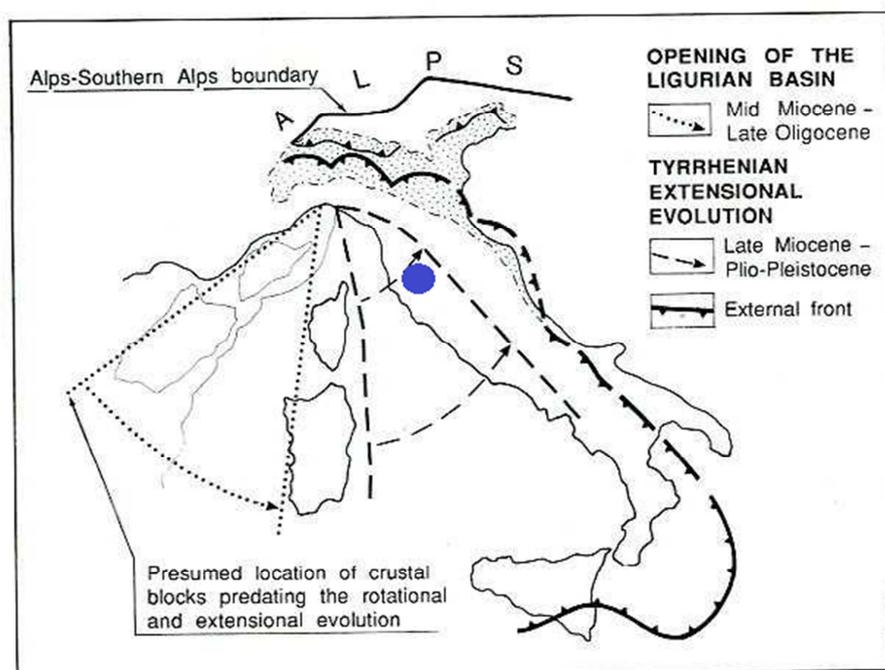


Fig.5.3-Traslazione della paleocatena Appenninica in direzione NE, il pallino blu indica la posizione dell'area di studio (da Castellarin et alii, 1992).

[Digitare il testo]

Con il movimento verso Est, assecondato dal sollevamento crostale, la coltre ligure, fortemente tettonizzata a seguito delle deformazioni precedenti, va a ricoprire le strutture esistenti (il processo inizia alla fine dell'Oligocene con un punto massimo nel Tortoniano superiore). Dallo smantellamento erosivo della catena in emersione si depositano sedimenti a tessitura assai eterogenea (depositi di frana sottomarina, mega-brecce e olistostromi) che vanno ad intercalarsi ai sedimenti torbiditici di avanfossa.

Gli accavallamenti e piegamenti migrano successivamente verso ENE, via via che procede la subduzione ensialica, ed allo stesso modo migra il depocentro del bacino d'avanfossa, esternamente alla catena orogenica, dentro il quale si ha la deposizione delle serie torbiditiche oligo-mioceniche prodotto dello smantellamento dei margini continentali. Si può quindi affermare che: "l'Appennino Settentrionale è una catena costituita da differenti unità tettoniche che, durante i movimenti orogenetici, hanno subito traslazione e impilamento a causa di fenomeni compressivi, andando a costruire una struttura con andamento NO-SE e vergenza NE" (Bortolotti, 1992).

5.2 Geologia strutturale e tettonica

Le formazioni presenti nella zona interessata dal progetto appartengono alle seguenti unità, elencate in ordine geometrico di sovrapposizione dal basso verso l'alto:

- Unità di Monticiano-Roccastrada;
- Unità della Falda Toscana (Serie Toscana non Metamorfica);
- Unità Liguri;
- Complesso Neoautoctono;
- Depositi recenti ad attuali (Quaternari).

Le prime tre unità sono state interessate da intensi fenomeni tettonici, definiti fenomeni di tettonica faldista in un ambiente compressivo.

[Digitare il testo]

Durante il Miocene inferiore alcune unità “liguri”, depositate in un bacino compreso tra l’attuale Corsica e la Liguria, a basamento oceanico, sono state obdote su bacini a basamento continentale (area di deposizione della Serie Toscana), interrompendone la sedimentazione; a sua volta i termini della Serie Toscana si sono accavallati verso Est dando luogo a quella che è chiamata Falda Toscana. Le deformazioni causate portarono alla formazione di pieghe vergenti a NE e faglie e fratture posizionate in senso normale (NW-SE), quindi Appenninica, e parallelo (SW-NE), quindi anti-Appenninico, alla vergenza.

Le Formazioni metamorfiche dell’Unità di Monticiano-Roccastrada, appartenenti all’ Unità di Massa definita da Rau e Tongiorgi (1974), si sarebbero sovrapposte al basamento paleozoico autoctono della Toscana meridionale, che in affioramento è rappresentato dall’Unità di Boccheggiano (Burgassi et Alii, 1979), affiorante a Ovest del Comune di Monticiano. Questa unità alloctona corrisponderebbe ad una grande anticlinale coricata Est-vergente, totalmente sradicata dalla sua area di provenienza. In molte zone la successione carbonatica mesozoica e silico-clastica cenozoica della Serie Toscana fu completamente sradicata dai siti di origine, lasciando solo le evaporiti triassiche (Calcere Cavernoso) a contatto con il basamento (Serie Toscana ridotta).

Durante la fase di distensione del Miocene medio e Tortoniano superiore si ha la sovrapposizione delle Unità Liguri (Galestri e Palombini) alla Serie Toscana non metamorfica (Calcere Cavernoso) tramite sovrascorrimento.

Successivamente, a seguito dell’instaurarsi di un regime distensivo, originato dall’apertura del mar Tirreno, iniziato nel Messiniano e perdurato fino al Pliocene, si ha lo sviluppo di una tettonica ad horst e graben con conseguente assottigliamento crostale ed impostazione di alti e bassi strutturali divisi da faglie con orientazione WSW-ENE. La tettonica distensiva e l’assottigliamento crostale hanno favorito l’intrusione di magmi ed i fenomeni idrotermali associati, che caratterizzano gran parte della Toscana meridionale.

Nei bassi strutturali si ha la formazione dei bacini neoautoctoni, post orogenici. Si ha poi la deposizione delle alluvioni recenti al di sopra di questi terreni.

[Digitare il testo]

In corrispondenza dell'alveo del T. Farma è presente una faglia diretta denominata “Faglia di Petriolo” (Fig.5.4); più o meno perpendicolare a tale faglia principale è presente un'altra faglia diretta, che prosegue nella valle laterale del Fosso delle Caldanelle, mettendo in contatto il Calcere Cavernoso (ad Ovest), con l'Unità delle Liguridi (ad Est), nota come “Faglia delle Caldanelle” (Fig.5.4).

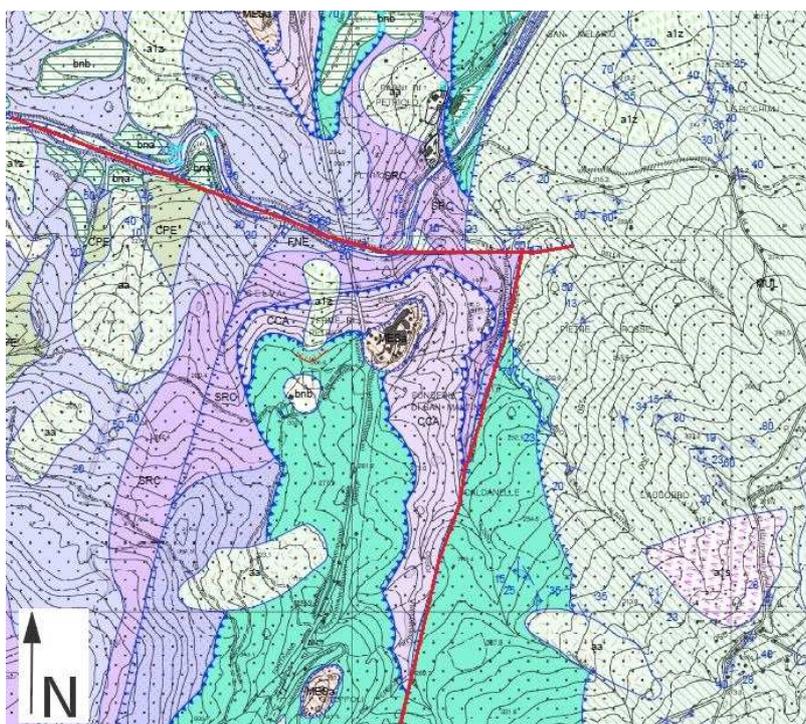


Fig.5.4– Estratto carta geologica regionale SEZIONE 307120 (Fig.4.6), in rosso sono evidenziate la “Faglia di Petriolo” e la “Faglia delle Caldanelle”. La “Faglia di Petriolo” è quella lungo l'alveo del T. Farma di direzione, La “Faglia Caldanelle” quella che si sviluppa in direzione N-S.

L'area di studio è caratterizzata da importanti fenomeni di termalismo, come sorgenti termali calde, emanazioni gassose e manifestazioni termali secondarie. Questi fenomeni hanno sede principalmente nell'area della valle del Torrente Farma in corrispondenza di importanti faglie. Il termalismo dell'area viene associato alla presenza dell'intrusione granitica in via di raffreddamento ipotizzata al di sotto dell'Unità di Monticiano-Roccastrada.

Di seguito la descrizione delle litologie appartenenti alle Unità precedentemente descritte.

[Digitare il testo]

5.3 Inquadramento litologico

Unità di Monticiano-Roccastrada (Triassico medio – sup.)

È l'unità basale della successione geologica locale e costituisce il basamento metamorfico. L'unità è fortemente tettonizzata ed ha subito metamorfismo epizonale.

Verrucano: i termini del basamento sono anche indicati genericamente come “Verrucano” (dalla località di Monte Verruca, presso Pisa). Vi si ritrovano differenti litologie a seconda della classe granulometrica dominante costituente la roccia originaria. Si tratta di rocce metamorfiche di tipo prevalentemente scistoso (argilloscisti e scisti sericitici). Prevalgono gli argilloscisti (Fig.5.5) con intercalazioni di strati quarzo-arenitici e conglomerati quarzosi (Fig.5.6). Il colore varia da grigio a rosso-violaceo. Sono presenti piani di scistosità e alterazione idrotermale. Il Verrucano affiora lungo il letto del Fiume Farma nel tratto compreso tra il viadotto del Farma e i Bagni di Petriolo, lungo il Fosso delle Caldanelle nel tratto dopo la sorgente termale “*Le Caldanelle di Petriolo*” fino alla confluenza con il T. Farma e in maniera discontinua e sporadica su tutto il versante in sinistra idrografica del T. Farma. Il suo contatto superiore con il Calcere Cavernoso è di tipo tettonico costituito da un sovrascorrimento.



Fig.5.5-Affioramento di Verrucano in facies scistosa. Foto eseguita da Gruppo Strabag in area di cantiere.

[Digitare il testo]



Fig.5.6-Affioramento di Verrucano in facies arenitica. Foto eseguita da Gruppo Strabag in area di cantiere.

Unità della Falda Toscana (Triassico sup.)

L'Unità è rappresentata dai termini della Serie Toscana non metamorfica.

Calcare Cavernoso (CV): calcare brecciato con origine principalmente dalla formazione anidritica, originatosi in seguito ad un processo di idratazione, dissoluzione e asporto del solfato, contenuto nelle anidriti di Burano, ad opera delle acque meteoriche subaeree e sotterranee (Lazzarotto, 1993).

Prevalentemente di colore chiaro con lenti e tasche di sabbie silicee o marnose (Fig.5.7). Si presentano nell'area di studio con uno spessore di circa 50–60 m. I punti d'affioramento principali si trovano lungo il Fosso delle Caldanelle nei pressi della sorgente termale “*Le Caldanelle di Petriolo*” e nel tratto precedente oltre all'area presso il cimitero di Casal di Pari. Il contatto inferiore tra il Calcare Cavernoso e il Verrucano e quello superiore con i Galestri e Palombini è di tipo tettonico costituito da un sovrascorrimento. Le anidriti di Burano sono una formazione costituita da Anidrite un minerale formato da solfato di calcio anidro, istituita da Martinis & Pieri nel 1964 in seguito ai dati ottenuti dal sondaggio per la ricerca petrolifera. Esse sono d'origine deposizionale in un ambiente di piattaforma carbonatica – evaporitica.

[Digitare il testo]



Fig.5.7-Affioramento di Calcere Cavernoso. Foto eseguita da Gruppo Strabag in area di cantiere.

Unità Liguri (Cretaceo inf.)

Si tratta di termini ad elevato grado di alloctonia sovrascorsi da ovest verso est al di sopra dei termini della Falda Toscana o direttamente del basamento ove la Falda Toscana sia avanscorsa e completamente scollata. Le unità osservate nell'area fanno parte della zona ligure interna, ossia dell'*Unità ofiolitifera del M. Gottero*.

Si tratta di un lembo di crosta oceanica formatasi nell'oceano ligure – piemontese durante la fase di apertura (Giurassico superiore) e poi corrugata e traslata sul margine europeo durante la fase di chiusura (Cretaceo – Eocene medio).

Galestri e Palombin (GP): sono in contatto tettonico con il Calcere Cavernoso e il Verrucano. La formazione è composta da un'alternanza di livelli argillitici, a struttura scistosa di medio spessore, di colore grigio scuro con patine varicolori detti "Galestri" (Fig.5.8) e livelli di calcari silicei dello stesso colore ma solitamente di minor spessore a grana finissima detti "Palombini" (Fig.5.9). Sono fortemente tettonizzati. Il loro spessore nell'area di studio è di circa 40 m e sono sovrapposti con contatto tettonico al Calcere Cavernoso.

[Digitare il testo]

Gli affioramenti nell'area sono distribuiti lungo il Fiume Farma nel tratto dei Bagni di Petriolo, nell'area del Fosso Orcaglia che confluisce nel Fosso delle Caldanelle e nell'area limitrofa al tracciato stradale su ambo i lati tra la struttura di *Petriolo S.p.a Resort* e l'area dell'imbocco nord della galleria "Casal di Pari" .



Fig. 5.8-Affioramento di Galestri e Palombini in facies argillitica. Foto eseguita da Gruppo Strabag presso la galleria Greppoli.



Fig. 5.9-Affioramento di calcare siliceo appartenente alla formazione dei Galestri e Palombini. Foto eseguita da Gruppo Strabag presso la galleria Greppoli.

[Digitare il testo]

COMPLESSO NEOUTOCTONO

Si tratta di depositi post-orogenici, di origine sia marina che continentale, depositatisi in discordanza nei bacini che si sono formati a seguito della tettonica distensiva post-orogenica. Si dividono in Depositi continentali miocenici e Depositi marini pliocenici. Si trovano depositati al di sopra delle Unità Liguri e del Calcare Cavernoso mentre a tetto sono a contatto con i depositi recenti.

Depositi marini (Pliocene)

I depositi basali del Pliocene sono costituiti dalla Formazione argillosa di Luriano (Signorini, 1966), composta da argille con lenti conglomeratiche. La sedimentazione della Formazione argillosa di Luriano in un ambiente deposizionale di mare relativamente profondo ha perdurato per gran parte del Pliocene inferiore. In corrispondenza dei livelli più alti di questa formazione le caratteristiche sedimentologiche dei depositi mostrano tendenze regressive (letti conglomeratici all'interno delle argille), che preludono ad una completa emersione della zona.

Sabbie e sabbie argillose (S): sabbie gialle con frazione argillosa o limosa, molto compatte, mal stratificate e con presenza di macro-fossili. Presentano intercalazioni limose ed argillose. Sono affioranti a ovest della strada S.S. 223 Paganico nel tratto precedente il viadotto Farma.

Depositi continentali recenti (Pleistocene-Olocene)

Travertini (T): calcari concrezionali, spugnosi, terrosi o sabbiosi di colore bianco, grigiastro o giallino. Possono essere compatti. Nell'area associati ad alluvioni terrazzate e intercalati a sabbie argillose. Frequentemente i Travertini sono associati a emergenze termali. Nell'area di studio si trova un affioramento di modeste dimensioni in sinistra idrografica del Merse prima della confluenza con il Torrente Farma.

Depositi alluvionali antichi (AT): ci sono due tipi di terrazzi nell'area che si differenziano in base all'età. I corsi d'acqua principali, come il Merse, hanno formato pianure alluvionali abbastanza estese con limitata differenza di quota.

[Digitare il testo]

I corsi secondari, invece, hanno depositato terrazzi antichi a differenti quote per l'azione erosiva nel corso nel tempo. Nel complesso sono formati da sabbie con intercalazioni di ghiaietto, ghiaie e ciottoli con elementi eterometrici (fino a 30-40 cm di diametro) ed eterogenei (di natura prevalentemente anagenitica e quarzifica, subordinatamente calcarea). In area li troviamo principalmente sugli argini del Torrente Farma nel tratto precedente il viadotto e in modo variabile sugli argini del Fiume Merse nel tratto successivo della confluenza con il Torrente Rosia.

Depositi alluvionali attuali (A): si trovano lungo le aste dei principali corsi d'acqua, Merse e Farma nell'area in questione, con differenti estensioni e spessori che diminuiscono allontanandosi dall'alveo del corso. La composizione comprende le differenti classi granulometriche: limo, argilla, sabbia e ciottoli.

Detriti (DT): coperture detritiche incoerenti di varia natura generate da processi di versante, eluviali e colluviali. Vanno a deporsi sulle formazioni precedenti o, in certi casi, direttamente sui Depositi alluvionali attuali o terrazzati.

[Digitare il testo]

Capitolo 6 – Geologia di progetto attraversata dalle gallerie

In questo capitolo verrà illustrata la situazione geologica attraversata dalle gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli”. In Fig.6.1 è rappresentata la legenda valida per i profili di entrambe le gallerie.

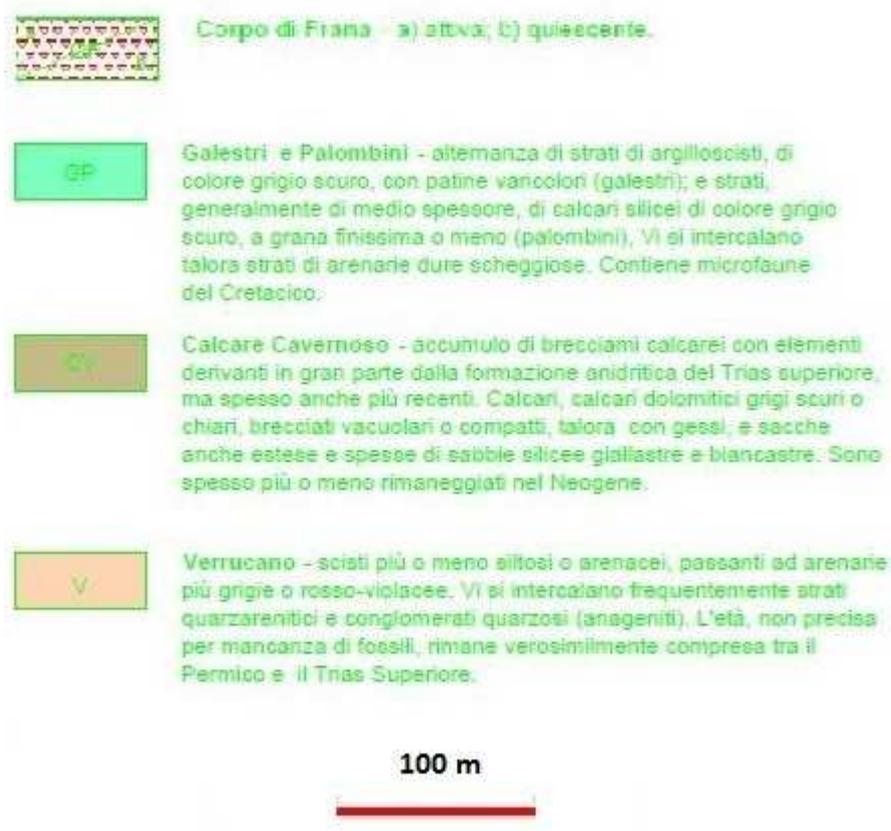


Fig.6.1 – Legenda profili gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli”.

6.1 La galleria “Casal di Pari”

La galleria “Casal di Pari” si estende per 1.7 km occupando le progressive dalla Pk 3+810 imbocco sud, alla progressiva Pk 5+510, imbocco nord. Il tratto che va dalla progressiva Pk 3+821 alla 5+248 è interessato, secondo il progetto, dalla presenza di falda mentre nell'ultimo tratto la falda si ritrova a quota inferiore rispetto al tracciato. Le diverse litologie interessate presentano valori di permeabilità molto differenti.

[Digitare il testo]

Dal punto di vista della litologia la galleria attraversa, dalla progressiva Pk 3+810 la formazione metamorfica del Verrucano, in facies a tratti scistosa e a tratti quarzoarenitica (Fig.6.2).

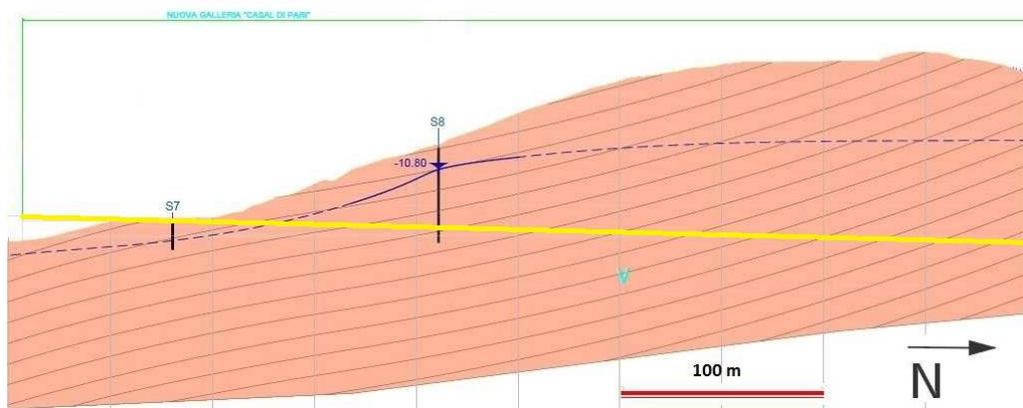


Fig.6.2– Profilo galleria “Casal di Pari” da progressiva PK 3+810 a 4+250. In giallo evidenziato il tunnel.

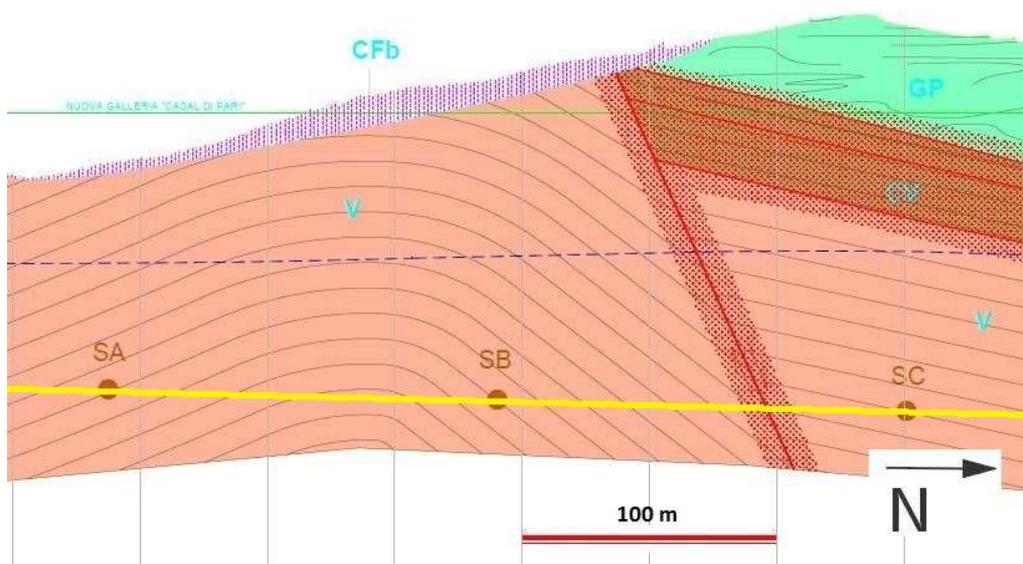


Fig.6.3– Profilo galleria “Casal di Pari” da progressiva PK 4+250 a 4+650. In giallo evidenziato il tunnel.

Questo zona è caratterizzata da alterazione idrotermale e, alla progressiva Pk 4+500 circa, incrocia una faglia di direzione 95° - 100° N e inclinazione 75 - 80° (Fig.6.3). Essa “ribassa il lembo settentrionale in corrispondenza del quale si osserva la presenza di alcune falde di accavallamento costituite da Calcarea Cavernoso e dai Galestri e Palombini” (Fiocco & Ilardo, 2012).

[Digitare il testo]

I successivi 300 m sono scavati nella formazione del Calcarea Cavernoso e Galestri e Palombini.

Questo tratto risulta interessato da grossi spessori di roccia fortemente cataclasata in forma di breccia grossolana in matrice argilloso-limoso. Tramite le stazioni geomeccaniche su affioramento e le indagini geognostiche sono stati ricavati i dati per la progettazione della galleria, che hanno consentito di effettuare la classificazione RMR (Bieniawski 1989). Il risultato ottenuto classifica gli ammassi rocciosi attraversati nelle classi II e III ossia “buona” e “discreta”. Occorre però tenere conto che i rilevamenti sono stati effettuati su affioramenti litoidi delle diverse formazioni affioranti e quindi non rappresentativi delle porzioni più tettonizzate ed alterate. Questo significa che il valore di RMR è stato sovrastimato e per questo gli ammassi rocciosi sono stati riclassificati nella classe III, ossia “discreta”, per quanto riguarda la facies metarenitica e calcarea e IV, ossia “scadente”, per la facies scistosa tettonizzata. Nel tratto finale la formazione intercettata è quella dei Galestri e Palombini.

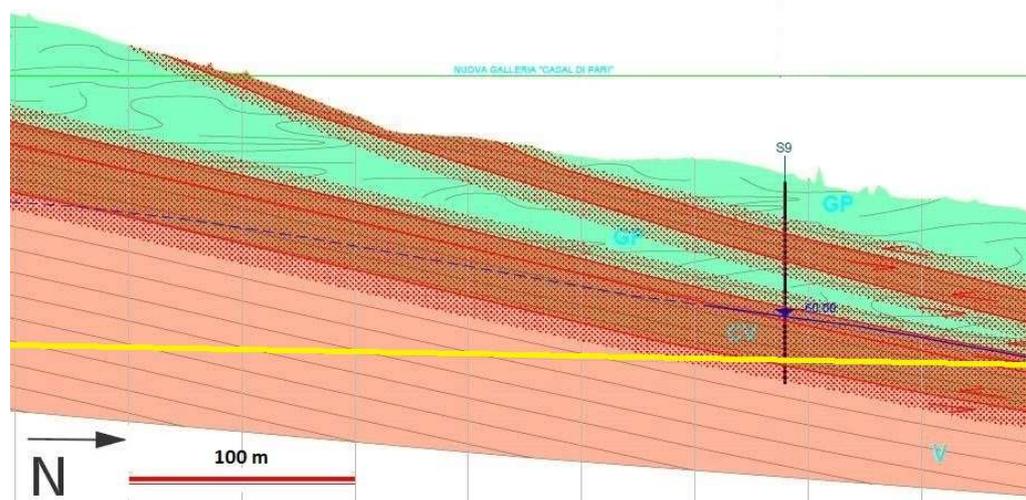


Fig.6.4– Profilo galleria “Casal di Pari” da progressiva PK 4+650 a 5+050. In giallo evidenziato il tunnel.

Importante segnalare la presenza di un corpo di frana, classificata quiescente, dalla progressiva Pk 5+200 fino alla progressiva Pk 5+450; essa ha dato segni di riattivazione per cui si è proceduto al consolidamento attraverso

[Digitare il testo]

ritombamento a valle con riprofilatura del versante per la messa in sicurezza del tracciato (Fig.6.5).

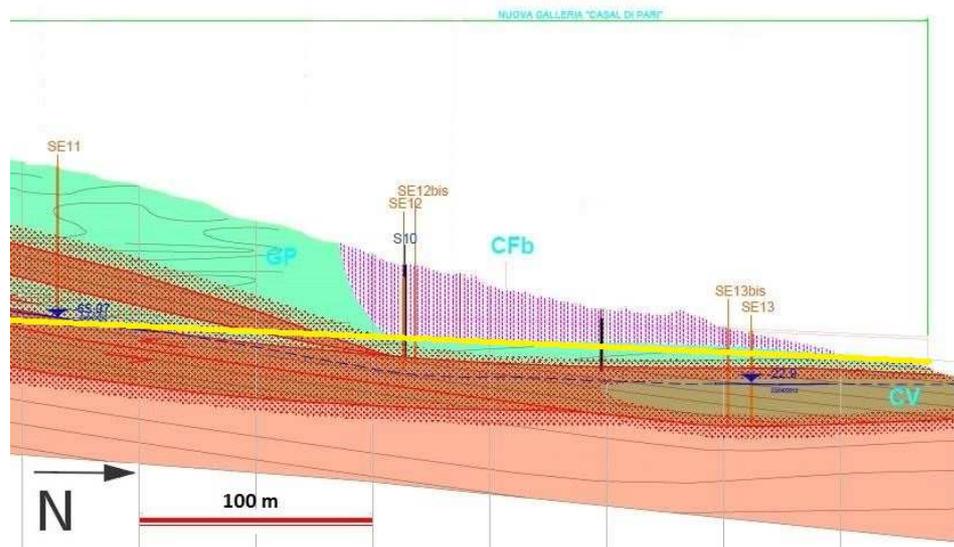


Fig.6.5– Profilo galleria “Casal di Pari” da progressiva PK 5+050 a 5+450. In giallo evidenziato il tunnel.

6.2 La galleria “Greppoli”

La galleria “Greppoli” è scavata nella formazione del Calcare Cavernoso e dei Galestri e Palombini. Il passaggio tra le due formazioni avviene tramite contatto tettonico alla progressiva Pk 5+778 . La galleria per la sua completa estensione, secondo il progetto, intercetta la falda acquifera che si posiziona all’altezza della quota media dell’arco rovescio (Fig.6.6).

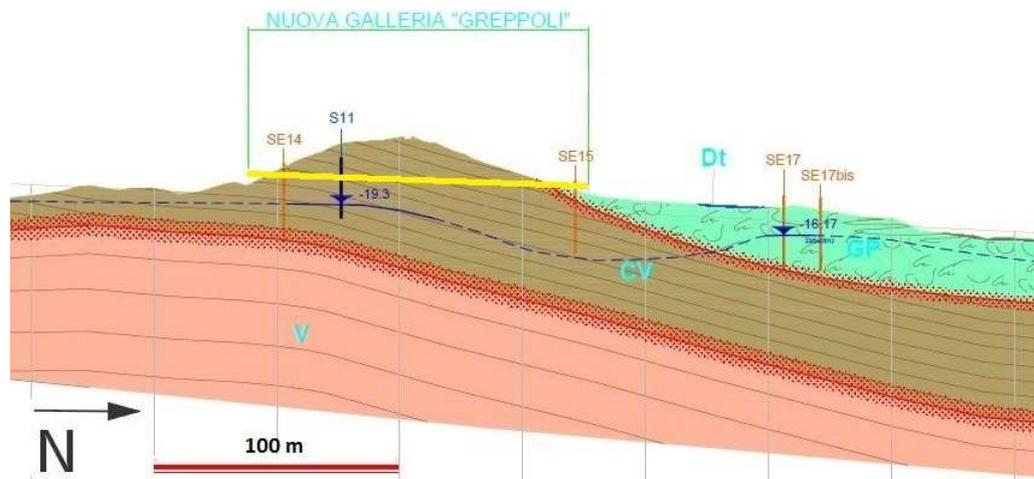


Fig.6.6– Profilo galleria “Greppoli” da progressiva PK 5+600 a 5+800. In giallo evidenziato il tunnel.

Capitolo 7 – Inquadramento geomorfologico



Fig.7.1- Panoramica dell'area di studio, eseguita da strada sterrata sopra l'imbocco nord della galleria "Casal di Pari" in direzione nord-est, 06/11/2014

La zona di studio è caratterizzata da rilievi sostanzialmente collinari, con morfologia abbastanza dolce, con quote nell'intervallo 250-500 m s.l.m. (Fig.7.1). Quest'area è influenzata geomorfologicamente dall'evoluzione tettonica che la ha strutturata, dalle differenti litologie che la compongono e dai processi erosivi che avvengono in quest'ambiente. I processi tettonici hanno condizionato l'orientazione delle principali valli torrentizie, che in molti casi seguono le linee di faglia come per la valle del Torrente Farma orientata in segmenti NNE-SSW e NNW-SSE (Fig.7.2).



Fig. 7.2– Estratto carta geologica regionale SEZIONE 307120 (Fig.4.6), in rosso sono evidenziate le linee di faglia che condizionano l'orientazione della valle del Torrente Farma.

[Digitare il testo]

I fiumi (Merse), i torrenti (Farma, Lanzo) ed i fossi dell'area, tutti tributari del bacino dell'Ombrone, sono responsabili della modellazione principale del territorio attraverso l'azione erosiva esercitata. Causa il sollevamento differenziale dell'area, infatti, relativo alla tettonica distensiva, i rilievi risultano profondamente incisi in forre con versanti caratterizzati da elevate pendenze. In particolare dove la litologia è maggiormente sensibile ai processi d'erosione, come nella formazione del Verrucano. Questo processo è ben osservabile nel canyon che forma il Torrente Farma, il quale si sviluppa appunto principalmente nella formazione del Verrucano, e all'altezza del viadotto raggiunge il suo culmine di pendenza con un dislivello di 150 m e pareti quasi verticali. Le elevate pendenze dei versanti che delimitano gli alvei torrentizi e la massiccia erosione al piede a cui sono sottoposti, insieme all'intensa tettonizzazione dell'area, provocano l'innescò di fenomeni d'instabilità di versante come scorrimenti rotazionali sulle porzioni più alterate del Verrucano e del Calcare Cavernoso.

[Digitare il testo]

Capitolo 8 – Inquadramento idrogeologico

L'area in esame si estende all'interno del bacino idrografico del Fiume Ombrone e le due sorgenti monitorate, "Le Caldanelle di Petriolo" e "Porcareccia", in particolare sono posizionate nel sottobacino del Torrente Farma.

Analizziamo le caratteristiche idrogeologiche delle varie unità ritrovate nell'areale di studio individuando la serie idrogeologica e quindi distinguendo fra acquiferi, acquitardi ed acquicludi. In genere si nota che gli ammassi rocciosi presentano una elevata eterogeneità composizionale ed una estensione limitata per cui non si sviluppano, in genere, sistemi di flusso estesi con sorgenti di grossa portata.

ACQUIFERI

Il Calcere Cavernoso è l'acquifero principale dell'area con una circolazione idrica ben sviluppata. Ciò è dovuto alla presenza abbondante e diffusa di pori o cavità (da cui il termine "Cavernoso") più o meno comunicanti, di reticoli fessurativi localizzati o diffusi e di condotti di dissoluzione ramificati e più o meno ampi. Il tutto induce condizioni di elevata permeabilità secondaria per fratturazione e carsismo (Fiocco & Ilardo, 2012), con valori di K che possono anche arrivare a 10^{-4} m/s. Nell'area di studio va a costituire falde in grado di alimentare sorgenti discrete. L'acquifero di Calcere Cavernoso d'interesse per la possibilità d'impatto delle gallerie risiede nell'area del bacino idrografico del Fosso del Fontanino che ha una estensione di 0.49 kmq , delimitato da uno spartiacque topografico dai bacini idrografici del Fosso della Rilucia e del Torrente Farma in cui poi confluisce tramite il Fosso Caldanelle. Sul versante ovest rispetto la strada S.S. 223 di Paganico è delimitato dal sovrascorrimento che taglia il versante in direzione circa N – S alla quota compresa tra 350–400 m s.l.m..

[Digitare il testo]

ACQUITARDI

Nel Verrucano la circolazione idrica sotterranea è quella tipica di un *hard-rock aquifer* quindi è limitata solamente alle porzioni o fasce interessate da fratturazione o è limitata al mantello di alterazione superficiale. Peraltro la presenza di una matrice argilloscistosa non permette di definire l'ammasso come un *hard rock aquifer* ma come un acquitardo che, localmente, può assumere le caratteristiche di un modesto acquifero. Può essere definito pertanto un acquitardo a bassa permeabilità e localmente un acquifero a permeabilità molto bassa, con una conducibilità media dell'ammasso roccioso variabile fra 10^{-6} e 10^{-7} m/s.

Una situazione simile si riscontra nei Galestri e Palombini in cui una circolazione idrica attiva può svilupparsi solamente nella porzione litoide calcarea, con capacità di sostenere sorgenti piccole e irregolari. Correttamente si dovrebbe parlare di un ammasso eterogeneo a comportamento idraulico ben differenziato. In grande, comunque, rimane un acquitardo a bassa permeabilità.

I depositi Neogenici e Quaternari sono classificati come terreni a permeabilità variabile, nel complesso media, per porosità. Per via della loro discontinuità e limitata estensione nell'area non possiedono una buona circolazione idrica salvo la possibilità che nella coltre detritica si formino acquiferi epidermici.

Le acque sotterranee presenti nell'area sono legate a due sistemi di circolazione idrica sotterranea ben distinti.

Il primo, più superficiale, è costituito da acque freatiche in stretta e veloce relazione con le precipitazioni ed è contraddistinta da un chimismo bicarbonato alcalino terroso con bassa temperatura e salinità. Laddove tale circolazione interessa il Calcare Cavernoso, a composizione anidritica, le acque assumono un chimismo solfato-calcico (a questa categoria appartiene la sorgente "*Porcareccia*", monitorata nella presente tesi).

Il secondo è relativo ad una circolazione più profonda dove le acque meteoriche raggiungono i serbatoi termali profondi attraverso la fratturazione delle rocce e ne vengono influenzate nel chimismo e nelle proprietà (a questa categoria appartengono le acque emergenti alla sorgente "*Le Caldanelle di Petriolo*").

[Digitare il testo]

Circuiti idrotermali

Nell'area della valle del Torrente Farma ci sono fenomeni di termalismo importanti. Essi si presentano con sorgenti termali calde, emanazioni gassose e manifestazioni termali secondarie che risalgono lungo le faglie principali.

L'attività termica dell'area è rapportata a un'intrusione magmatica in via di raffreddamento posta al di sotto dell'Unità di Monticiano-Roccastrada a una profondità di circa 1.800 m sotto il livello del mare.

Lungo la faglia di Petriolo e la faglia delle Caldanelle (vedi Inquadramento Geologico) si verificano risalite di fluidi idrotermali che alimentano le sorgenti dei Bagni di Petriolo e delle Caldanelle. Queste acque termali, che risalgono per spinte termo-artesiane, si combinano con acque fossili marine contenute all'interno dei sedimenti marini neogenici mutando il proprio chimismo da solfato bicarbonato-alcantino terroso a clorurato-sodico.

Capitolo 9 – Gallerie e impatto ambientale

L'intercettazione di acque sotterranee durante lo scavo di una galleria può costituire una problematica per la progettazione e la costruzione causando il rallentamento e in certi casi anche il collasso della perforazione (Tseng et al., 2001), oltre a provocare la modifica delle condizioni e quindi dei dimensionamenti dei rivestimenti e infine l'aumento dei costi (Cesano et al., 2000; Day, 2004; Lee et al., 2003 Schwarz et al., 2006). Importante poi il considerevole impatto ambientale che si può sviluppare con la modifica delle condizioni idrogeologiche della roccia o terreno nell'intorno dello scavo. In generale una galleria costituisce un'interferenza nella circolazione dell'acqua sotterranea (Fig.9.1), andando quindi a modificare le condizioni d'equilibrio preesistenti (Civita, 2005).

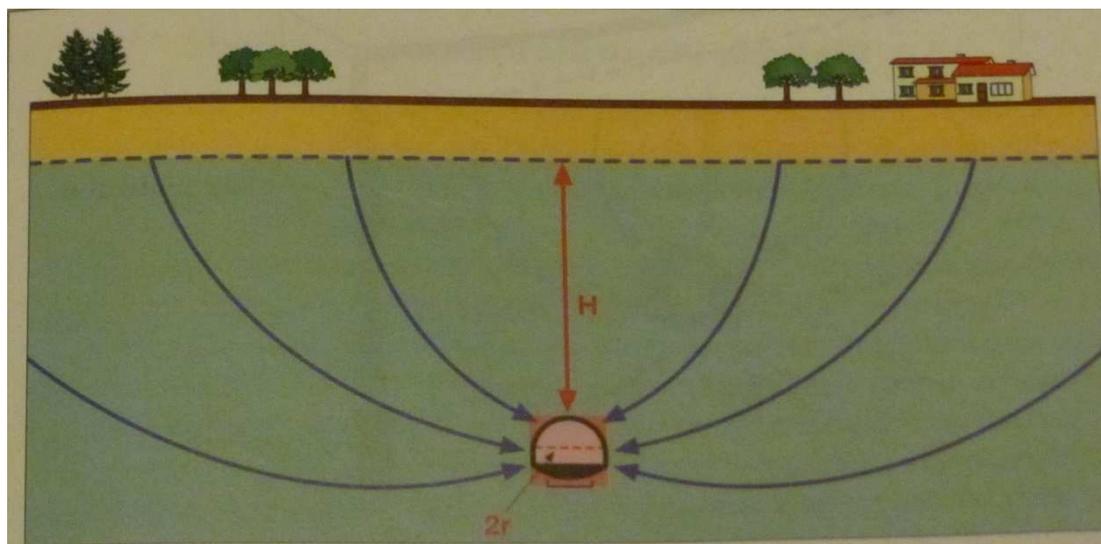


Fig.9.1-Abbassamento del livello piezometrico per drenaggio di una galleria; H è battente piezometrico sulla calotta; 2r è il diametro del cavo. (Civita 2005).

Una galleria, se impermeabilizzata, può costituire un ostacolo alla dinamica naturale dell'acquifero impegnato (effetto diga; “*dam effect*”) generando rigurgiti con sovralzamento del livello piezometrico a monte-flusso e impoverimento a valle-flusso. Se invece, come sovente avviene, ha un comportamento drenante nei confronti delle acque sotterranee essa funge da punto di richiamo per le medesime costituendo una zona a permeabilità infinita (o comunque molto più alta) all'interno dell'ammasso roccioso.

[Digitare il testo]

Questa situazione può comportare notevoli danni all'ambiente/ecosistema ed alle risorse idriche sotterranee compromettendo anche la circolazione delle acque superficiali, se alimentate da un importante deflusso di base. I danni possono essere di varia natura, ambientali e socioeconomici: abbassamento della falda con conseguente subsidenza del terreno e generazione di crolli e frane da collasso; prosciugamento totale o parziale di sorgenti/pozzi con danni alla popolazione e all'economia del luogo (Sjolander-Lindqvist, 2005); potenziali contenziosi sul diritto all'uso dell'acqua drenata (Parry et al., 2000); mancanza del Deflusso Minimo Vitale per torrenti e fiumi; impatti sugli ecosistemi dipendenti dalla falda (GDE; *Groundwater Dependent Ecosystems*), danni a vegetazione e colture, cambiamento della qualità delle acque. Quest'ultimo tipo di danno non è da sottovalutare ed è causato dal contatto delle acque con le sostanze utilizzate nello scavo di una galleria, come additivi stabilizzanti e integrativi delle cementazioni (*grouting*), catalizzatori e inerti. Il livello d'impatto dipenderà dalla portata d'acqua drenata al sistema naturale e dagli abbassamenti provocati alla falda (Ii and Kagami, 1997; Kitterod et al., 2000).

Le indagini idrogeologiche *ante-operam* conseguentemente sono molto importanti per cercare di prevenire queste situazioni e si dovranno concentrare sull'individuazione delle acque sotterranee che possono interferire con l'opera nelle diverse fasi al fine di valutare il potenziale impatto. Risulta quindi di particolare rilevanza la previsione della portata drenata (Goodman, 1965; Federico, 1984; Lei, 1999; Perrochet, 2005; Zang & Franklin, 1993; Mestat et al., 2004; Molinero et al., 2002; Kolymbas & Wagner, 2007; Marechal & Perrochet, 2003; Perrochet, 2005; Perrochet & Dematteis, 2007; Feinstein et al., 2003; Yoo, 2005; Yang and Yeh, 2007).

Per un efficace prognosi dello scenario idrogeologico nelle prima fase d'indagine della tesi sono stati analizzati i seguenti punti:

- Identificazione plano-altimetrica del tracciato;
- Esame degli elementi noti dalla letteratura e dalla cartografia topografica, geologica e idrogeologica disponibile;
- Censimento e georeferenziazione dei punti d'acqua presenti nell'area.

[Digitare il testo]

In una successiva fase, che verrà descritta nella parte dedicata all'interpretazione dei dati, sono state identificate le strutture idrogeologiche che verranno coinvolte nello scavo, valutate le risorse idriche potenzialmente drenabili dall'opera anche tramite i risultati del monitoraggio dei diversi punti d'acqua. Il monitoraggio delle acque è consistito nella misura periodica di diversi parametri, principalmente portata per le sorgenti e livello di falda nei piezometri.

L'acquifero che può essere impattato dalla galleria "Casal di Pari" è il Calcare Cavernoso con uno spessore circa di 40 m nel tratto intercettato. Esso si trova in una fascia cataclastica dovuta alla presenza di un sistema di sovrascorrimento che funge da contatto superiore con l'acquitrando dei Galestri e Palombini e da contatto inferiore con l'acquitrando del Verrucano. Il Calcare Cavernoso viene intercettato dalla progressiva Pk 5+000 alla progressiva Pk 5+150. La galleria "Greppoli" intercetta nel suo intero percorso l'acquifero del Calcare Cavernoso anche in questo caso a contatto con gli acquitrandi del Verrucano e dei Galestri e Palombini tramite il sistema di sovrascorrimento. In questo tratto lo spessore del Calcare Cavernoso è di circa 60 m. La quota dell'acquifero dall'imbocco sud della galleria "Casal di Pari" alla progressiva Pk 5+000, dove viene intercettato, è superiore al cunicolo, mentre nel tratto dalla progressiva Pk 5+150 all'imbocco nord è inferiore.

PARTE III – MATERIALI E METODI

Capitolo 10 – Monitoraggio ante-operam

La campagna di monitoraggio *ante-operam* è partita nel Luglio 2012 ed è terminata con l'inizio delle opere di cantierizzazione a Novembre-Dicembre 2013 durando quindi per un periodo di 1 anno e 6-7 mesi. I punti di misura sono stati scelti con criteri che hanno tenuto conto dell'ubicazione del cantiere e delle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche della zona. Di ogni punto di monitoraggio sono state redatte schede monografiche da *Studio Mattioli s.r.l.*

Per quanto riguarda il monitoraggio delle acque superficiali esso è stato eseguito presso i corsi d'acqua: Torrente Farma e il Fosso della Rilucia. Nell'area relativa al nostro studio sono state monitorate 2 stazioni per corso d'acqua, una a monte ed una a valle rispetto alle aree soggette a cantierizzazione (Fig.10.1 e Fig.10.2). Da segnalare che nonostante nel nostro studio siano stati utilizzati solo i dati relativi alla portata delle stazioni prima elencate per determinare una potenziale diminuzione del deflusso il monitoraggio delle acque superficiali è stato eseguito allo scopo principale di individuare eventuali sversamenti di sostanze inquinanti dovuti alle attività di cantiere.

Punto	Monitoraggio ante-operam acque superficiali				
	Ubicazione	Quota m.l.m.	inizio	fine	N. di campagne
ASP01	T. Farma Valle	152	28/06/2012	20/09/2012	2
ASP06	T. Farma Monte	154	28/06/2012	20/09/2012	2
ASP02	F. Rilucia Valle	248	28/06/2012	12/09/2012	2
ASP05	F. Rilucia Monte	251	28/06/2012	12/09/2012	2

Fig.10.1- Tabella punti d'acqua monitoraggio *ante-operam* acque superficiali.

[Digitare il testo]

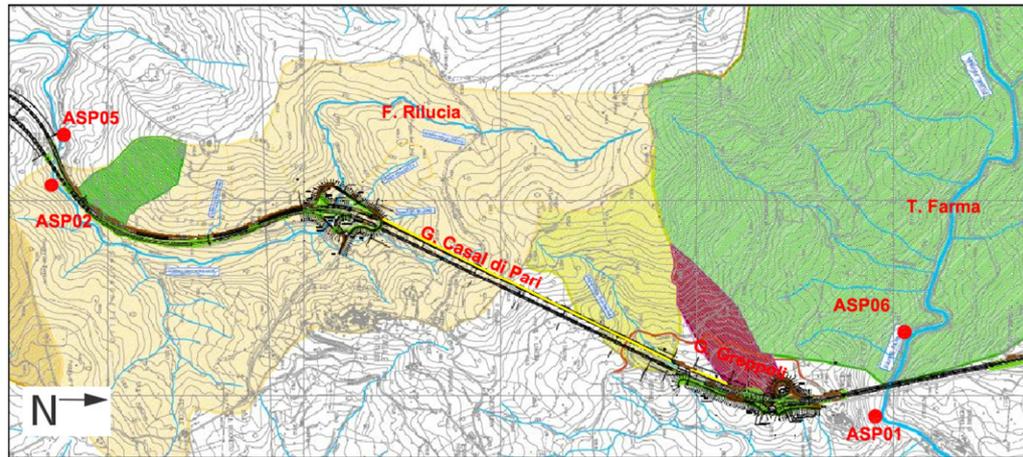


Fig.10.2- Estratto carta corografica dei bacini idrografici (Fig.2.4) con evidenziati i punti di monitoraggio ante-operam delle acque superficiali e in giallo i nuovi tratti di gallerie.

Le misurazioni effettuate erano relative alla portata, eseguite attraverso il metodo correntometrico mediante mulinello meccanico intestato su asta, e alla determinazione dei parametri chimico-fisici *in situ* oltre al prelievo di campioni d'acqua per analisi chimico-batterologiche in laboratorio. Inoltre sono state effettuate analisi ecologiche: l'Indice Biotico Esteso (I.B.E.) (APAT – IRSA CNR 2003 Met .9010) (solo sul Torrente Farma, dove era possibile effettuarlo), e, da Aprile 2013, su richiesta di ARPAT (Agenzia Regionale di Protezione Ambientale della Toscana) l'indice STAR_ICMi determinato con il metodo MacOper (Buffagni & Erba 2007). L'Indice biotico esteso (I.B.E.) verifica la qualità di ecosistemi in acque correnti sulla base di cambiamenti nelle comunità di macroinvertebrati mentre l'indice STAR_ICMi si basa sull'analisi della struttura della comunità di macroinvertebrati bentonici esprimendo lo stato ecologico di un corso d'acqua in termini di *Ecological Quality Ratio* (EQR). Tali indici sono di solito determinati laddove si ravvisi il rischio di un impatto ecologico sul corso d'acqua da parte di potenziali scarichi di cantiere.

Per quanto riguarda il monitoraggio dell'acque sotterranee si è basato sui seguenti punti di misura: 7 sorgenti ubicate in una fascia di circa 1 km da entrambi i lati del tracciato stradale (Fig.11.2).

[Digitare il testo]

Le misurazioni fatte in questi punti erano relative alla portata, con utilizzo del metodo volumetrico (tempo impiegato a riempire un recipiente di capacità determinata), alla determinazione dei parametri chimico-fisici *in situ*.

Punto	Monitoraggio ante-operam acque sotterranee		
	Manuale		
	Inizio	Fine	N. campagne
Sorgente Caldanelle	26/07/2012	16/04/013	2
Sorgente AST 01	26/07/2012	16/04/2013	2
Sorgente AST 02	21/08/2012	16/04/013	2
Sorgente AST 04	21/08/2012	16/04/013	2
Sorgente AST 05	21/08/2012	16/04/013	2
Sorgente AST 06	20/09/2012	16/04/013	2
Sorgente AST 10	?	16/04/2013	2

Fig. 10.3- Tabella fasi monitoraggio *ante-operam* punti acque sotterranee.

Capitolo 11- Monitoraggio in corso d'opera

11.1 Inquadramento generale

La campagna di monitoraggio in corso d'opera, effettuata nell'ambito della presente tesi con il supporto tecnico di *Studio Mattioli s.r.l.*, si è basata su una rete costituita da 17 punti d'acqua: 8 sorgenti e 7 piezometri (Fig.11.1; Fig.11.2). La campagna è iniziata nel Novembre 2013. I dati raccolti sui punti d'acqua da noi monitorati consistono in: misura della portata per le sorgenti e del livello piezometrico per i piezometri; misura dei parametri chimico-fisici effettuata *in situ*: temperatura, pH, conducibilità elettrica compensata a 21 °C, potenziale redox, contenuto d'ossigeno (espresso sia in percentuale sia in mg/L). I dati delle sorgenti monitorate da *AMBIENTE S.C. Ambiente ingegneria ambientale e laboratori* fanno riferimento solo alla portata.

Da Novembre 2013 a Marzo 2014 la campagna si è svolta con un'uscita mensile e relativa raccolta dati con compilazione di schede per ogni punto d'osservazione. Da Marzo 2014 in 5 piezometri e nelle sorgenti “*Porcareccia*” e “*Le Caldanelle di Petriolo*” sono stati installati dei sensori per misurazioni in continuo del livello idrico (piezometrico nei piezometri, battente d'acqua negli stramazzi delle sorgenti) dei parametri di temperatura e conducibilità elettrica. Nei restanti 2 piezometri sono stati installati da Giugno 2014. In questo modo da Marzo 2014 si è reso disponibile un monitoraggio in continuo di afflussi, deflussi e livello piezometrico i cui dati sono stati scaricati mensilmente in occasione delle uscite in campagna.

Per quanto riguarda il monitoraggio in corso d'opera delle sorgenti monitorate durante la campagna *ante-operam* da *Studio Mattioli s.r.l.*, esclusa “*Le Caldanelle di Petriolo*” e la “*Porcareccia*”, esso è stato affidato all'azienda: *AMBIENTE S.C. “Ambiente-Ingegneria ambientale e laboratori”* con sede a Firenze di cui *Gruppo Strabag* ci ha fornito i dati.

[Digitare il testo]

Punto	Monitoraggio in corso d'opera acque sotterranee				
	Manuale			In continuo	
	Inizio	Fine	N. campagne	Inizio	Fine
Sorgente Porcareccia	26/11/2013	15/01/2015	5	01/03/2014	15/01/2015
Sorgente Caldanelle	26/11/2013	15/01/2015	14	01/03/2014	15/01/2015
Sorgente AST 01	19/03/2014	23/10/2014	5		
Sorgente AST 02	19/03/2014	23/10/2014	5		
Sorgente AST 04	23/12/2013	23/10/2014	10		
Sorgente AST 05	23/12/2013	23/10/2014	10		
Sorgente AST 06	23/12/2013	23/10/2014	10		
Sorgente AST 10	23/12/2013	23/10/2014	10		
Piezometro S1	26/11/2013	15/01/2015	14	01/03/2014	15/01/2015
Piezometro S2	26/11/2013	15/01/2015	14	01/03/2014	15/01/2015
Piezometro S3	26/11/2013	15/01/2015	14	01/06/2014	15/01/2015
Piezometro S4	26/11/2013	15/01/2015	14	01/06/2014	15/01/2015
Piezometro S5	26/11/2013	15/01/2015	14	01/03/2014	15/01/2015
Piezometro A/P1	26/11/2013	15/01/2015	14	01/03/2014	15/01/2015
Piezometro C/P2	26/11/2013	15/01/2015	14	01/03/2014	15/01/2015

Fig.11.1- Tabella fasi monitoraggio in corso d'opera dei punti d'acqua sotterranea.

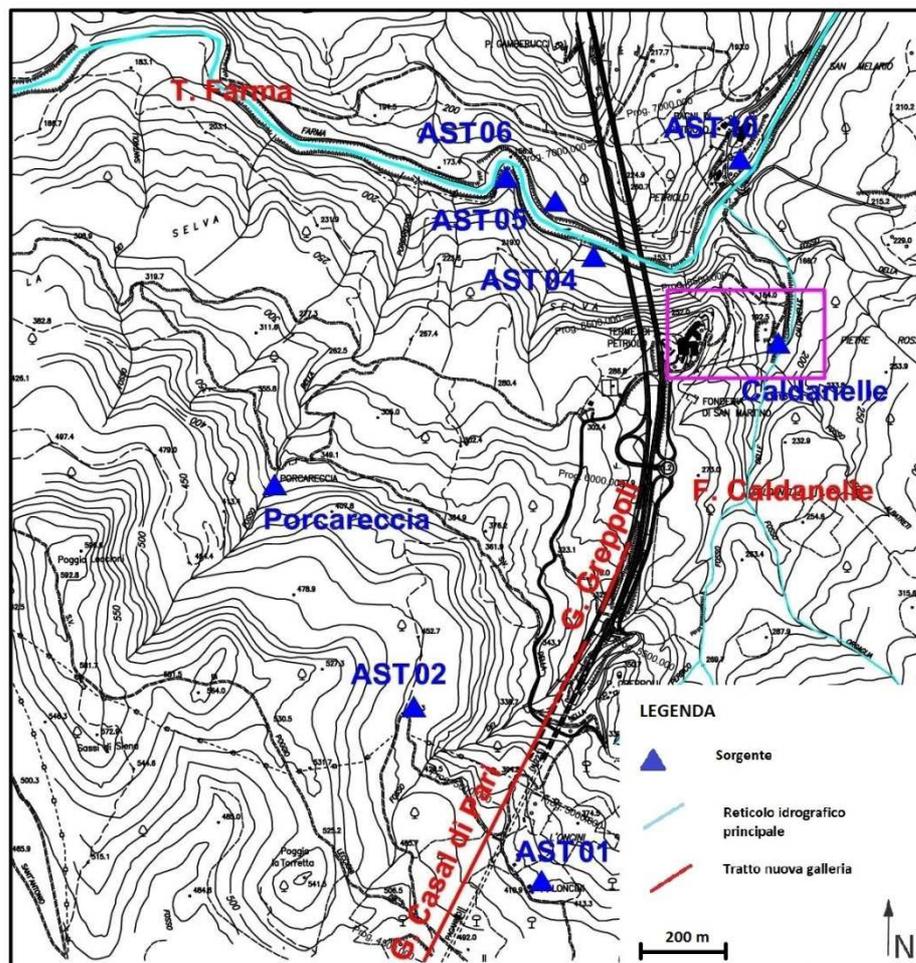


Fig.11.2- Ubicazione monitoraggio in corso d'opera punti d'acqua sotterranea. Riquadro viola area ubicazione piezometri (Fig. 11.6).

[Digitare il testo]

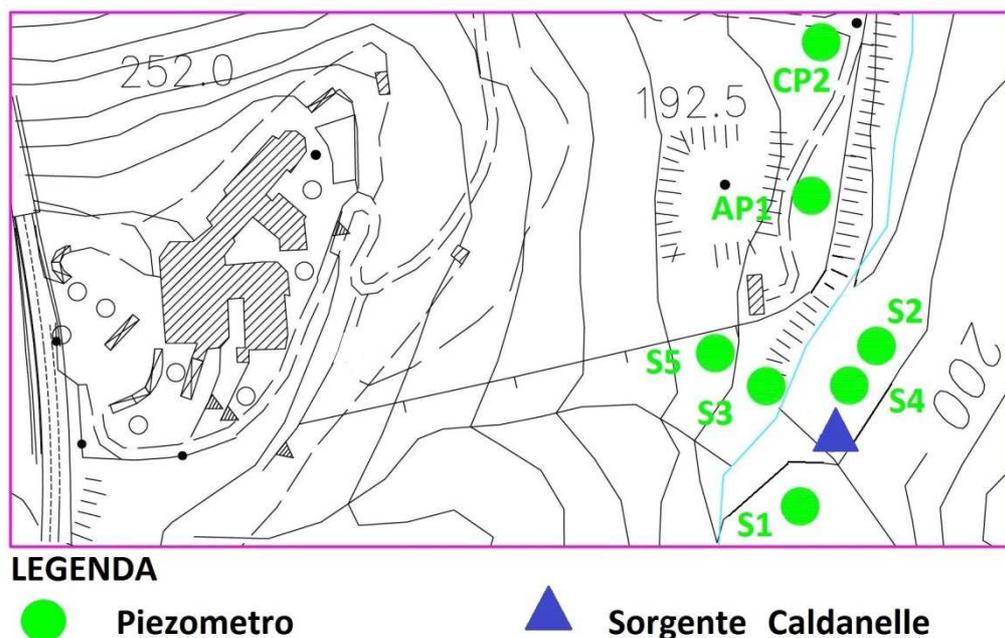


Fig.11.3- Ubicazione piezometri monitoraggio in corso d'opera, particolare riquadro viola carta Fig.11.2.

11.2 Descrizione punti d'acqua monitoraggio in corso d'opera

Il monitoraggio in corso d'opera è stato sia in continuo che in discontinuo (saltuario). I punti in cui è stato svolto il monitoraggio in continuo consistono in 2 sorgenti e 7 piezometri.

Il monitoraggio in discontinuo ha riguardato altre 6 sorgenti presenti nell'area, già oggetto di monitoraggio *ante-operam*. Queste sorgenti sono state denominate con le seguenti sigle: AST 01, AST 02, AST 04, AST 05 e AST06 e AST 10. Esse si trovano nell'area circostante le due sorgenti di cui è stato eseguito il monitoraggio in continuo.

[Digitare il testo]

Sorgenti

Coordinate Gauss-Boaga			
Punto	Longitudine	Latitudine	Quota m.l.m
Sorgente Porcareccia	1685995.87 E	4771399.98 N	341
Sorgente Caldanelle	1687361.52 E	4771676.13 N	200
Sorgente AST 01	1686600.85 E	4770287.57 N	399
Sorgente AST 02	1686613.21 E	4770712.47 N	352
Sorgente AST 04	1686856.36 E	4771874.39 N	180
Sorgente AST 05	1686018.63 E	4772246.68 N	185
Sorgente AST 06	1686616.24 E	4772260.53 N	175
Sorgente AST 10	1687334.21 E	4772386.36 N	152

Fig.11.4- Tabella con le coordinate e la quota delle sorgenti.

Sorgente “Porcareccia”

La “Porcareccia” è una sorgente di acque fredde ed è contraddistinta da bassa salinità. Essa si trova posizionata ad Ovest rispetto alla galleria “Casal di Pari” ad una distanza di circa 1 km e ad una quota di 21 m rispetto il piano stradale. La sorgente emerge dalla unità metamorfica del Verrucano. La sorgente viene captata da un bottino di presa (Fig. 11.5) al cui interno, tra la vasca di presa e quella di decantazione, è stato lo installato uno stramazzo per rendere possibile la misura della portata (Fig. 11.6). L’acqua relativa alla sorgente viene sfruttata per uso idropotabile da *Petriolo S.p.a. Resort*, risultando di grande importanza perché l’unica dell’area a rispondere a tali caratteristiche.



Fig.11.5-Bottino di presa sorgente “Porcareccia”, foto del 06/11/2014.



Fig.11.6-Stramazzo a parete sottile e luce triangolare della sorgente “Porcareccia” installato fra la vasca di presa e la vasca di decantazione. Foto del 06/11/2014.

Il primo Marzo 2014 è stata installata un sensore di livello piezo-resistivo dotato di *data-logger* che ha effettuato una misura ogni 5 minuti dei seguenti parametri: livello dell’acqua subito a monte della parete sottile dello stramazzo temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C.

Sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*”

La sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*” è una sorgente termale e quindi attribuibile a una circolazione più profonda dove le acque di infiltrazione meteorica interagiscono con fonti di calore e fluidi endogeni. Essa si trova lungo il Fosso delle Caldanelle circa all’altezza dell’impianto delle Terme di Petriolo. Rispetto al cantiere stradale della costruzione delle gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli” si trova posizionata a quota minore, rispetto il piano stradale della galleria “Casal di Pari” c’è una differenza di 120 m mentre rispetto il piano stradale della galleria “Greppoli” c’è una differenza di 98 m. Emerge in corrispondenza di un livello di circa 30 m di spessore di Calcere Cavernoso in contatto tettonico con il Verrucano a facies argilloscistosa e i Galestri e Palombini attraverso una faglia diretta (Fig. 4.6).

[Digitare il testo]

L'emergenza si trova all'interno di un vecchio bottino di presa (Fig.11.7), da cui viene convogliata in un serbatoio 50 m più a valle, nel Fosso delle Caldanelle, in cui è possibile regolare la portata di troppo pieno in uscita che viene immessa nel Fosso delle Caldanelle (Fig.11.8). In questo punto è stato installato lo stramazzo in cui viene misurata la portata lasciata defluire liberamente.



Fig. 11.7-Bottino di presa della sorgente “Le Caldanelle di Petriolo”. Foto del 06/11/2014.



Fig. 11.8- Serbatoio di gestione acque sorgente “Le Caldanelle di Petriolo” con stramazzo di troppo pieno. Foto del 06/11/201.

[Digitare il testo]

Dal 01/03/2014 è entrato in funzione una sonda dotata di data-logger che ha misurato con cadenza oraria i seguenti parametri: livello dell'acqua all'interno dello stramazzo da cui si è calcolata la portata, temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C.

Altre sorgenti

Si tratta di sorgenti emergenti dalla formazione del Verrucano.

Le sorgenti, tutte monitorate anche in fase *ante-operam*, AST 01, AST 02, AST 04, AST 05, AST 06 E AST 10 (vedi Fig.11.2 per ubicazione, Fig.11.4 per quota/coordinate e Fig.11.1 per fasi monitoraggio in corso d'opera) in corso d'opera sono state oggetto di monitoraggio da parte della società "Ambiente ingegneria ambientale e laboratori".

AST 01 e AST 02 si trovano nel bacino idrografico del "Fosso della Rilucia" a una quota superiore della galleria "Casal di Pari" mentre le restanti sorgenti si trovano lungo il letto del T. Farma (AST 04, AST 05 e AST 06 a monte rispetto al viadotto Farma mentre AST 10 a valle del viadotto Farma nei pressi dei Bagni di Petriolo).

Piezometri

I piezometri sono stati eseguiti da HERA s.r.l. nel Giugno 2010. In Fig. 11.6 si vede l'ubicazione mentre per la quota e le coordinate consultare la tabella in Fig.11.9.

Coordinate Gauss-Boaga			
Punto	Longitudine	Latitudine	Quota m.l.m
Piezometro S1	1687353.22 E	4771650.11 N	204
Piezometro S2	1687367.59 E	4771681.97 N	200
Piezometro S3	1687358.38 E	4771683.98 N	200
Piezometro S4	1687371.40 E	4771693.63 N	200
Piezometro S5	1687344.00 E	4771708.24 N	205
Piezometro A/P1	1687381.29 E	4771793.42 N	203.92
Piezometro C/P2	1687389.15 E	4771844.83 N	201.11

Fig.11.9- Tabella con le coordinate e le quote dei piezometri.

[Digitare il testo]

Piezometro S1

Il piezometro S1 si trova in sinistra idrografica del Fosso delle Caldanelle in posizione leggermente rialzata rispetto al letto a 4 m di distanza a monte della sorgente “ *Le Caldanelle di Petriolo*” (Fig.11.10).



Fig.11.10-Piezometro S1. Foto del 06/11/2014.

Esso si sviluppa fino a una profondità di 35 m. Fino a 33 m attraversa Calcarea Cavernosa e negli ultimi 2 m il Verrucano. Ha un diametro di 8 cm e il tratto filtrato va da 2 m a 31 m.

Il monitoraggio di questo piezometro è stato svolto manualmente con cadenza mensile dal 26/11/2013 al 13/02/2014. Dal 01/03/2014 è stata installata una sonda dotata di data-logger che ha effettuato misure ogni 6 ore dei seguenti parametri: livello di falda, temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C. Per quanto riguarda le fasi di monitoraggio in corso d’opera consultare la tabella in Fig. 11.1.

[Digitare il testo]

Piezometro S2

Il piezometro S2 si trova nel letto del Fosso delle Caldanelle in sinistra idrografica nei pressi del bottino di presa che raccoglie la sorgente, ad una distanza di 5 m (Fig.11.11).



Fig.11.11-Piezometro S2. Foto del 06/11/2014.

Esso raggiunge una profondità di 39 m. La stratigrafia è la seguente: dopo il terreno iniziale si ha dai 2 m ai 5 m detrito, dai 5 m ai 32.5 m Calcere Cavernoso e dai 32.5 m ai 39 m Verrucano. Ha un diametro di 8 cm, e il tratto filtrato va da 2 m a 20 m. Il monitoraggio di questo piezometro è stato svolto manualmente con cadenza mensile dal 26/11/2013 al 13/02/2014.

Dal 01/03/2014 è stata installata una sonda dotata di data-logger che ha effettuato misure ogni 6 ore dei seguenti parametri: livello di falda, temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C.

Per quanto riguarda le fasi di monitoraggio in corso d'opera consultare la tabella in Fig.11.1.

[Digitare il testo]

Piezometro S3

Il piezometro S3 si trova nel letto del Fosso delle Caldanelle in destra idrografica nei pressi del bottino di presa che raccoglie la sorgente, ad una distanza di 5 m (Fig.11.12).



Fig.11.12-Piezometro S3. Foto del 06/11/2014.

Esso si estende in profondità per 30 m attraversando per i primi 27.3 m Calcare Cavernoso e per i rimanenti nel Verrucano.

Ha un diametro di 8 cm, e il tratto filtrato va da 14 m a 20 m. Il monitoraggio di questo piezometro è stato svolto manualmente con cadenza mensile dal 26/11/2013 al 06/05/2014. Dal 01/06/2014 è stata installata una sonda dotata di data-logger che ha effettuato misure ogni 6 ore dei seguenti parametri: livello di falda, temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C.

Per quanto riguarda le fasi di monitoraggio in corso d'opera consultare la tabella in Fig. 11.1.

[Digitare il testo]

Piezometro S4

Il piezometro S4 si trova nel letto del Fosso delle Caldanelle in sinistra idrografica nei pressi del bottino di presa che raccoglie la sorgente, ad una distanza di 3 m (Fig.11.13).



Fig.11.13-Piezometro S4. Foto del 06/11/2014.

Esso raggiunge una profondità di 29.5 m nei quali la stratigrafia è la seguente: dopo il terreno iniziale si ha da 1.2 m a 3 m detrito, da 3 m a 28 m Calcere Cavernoso e infine 1,5 m di Verrucano.

Ha un diametro di 8 cm, e il tratto filtrato va da 20 m a 28 m. Il monitoraggio di questo piezometro è stato svolto manualmente con cadenza mensile dal 26/11/2013 al 06/05/2014. Dal 01/06/2014 è stata installata una sonda dotata di data-logger che ha effettuato misure ogni 6 ore dei seguenti parametri: livello di falda, temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C.

Per quanto riguarda le fasi di monitoraggio in corso d'opera consultare la tabella in Fig. 11.1.

[Digitare il testo]

Piezometro S5

Il piezometro S5 si trova in destra idrografica del Fosso delle Caldanelle, lungo il sentiero che ne porta all'alveo dalla strada che scende dal *Petriolo S.p.a. Resort* (Fig.11.14).



Fig.11.14-Piezometro S5. Foto del 06/11/2014.

Esso si sviluppa per 32 m di profondità con la seguente stratigrafia: dopo il terreno superficiale si ha da 0.95 m a 8.3 m copertura detritica, da 8.3 m a 28.7 m Calcere Cavernoso e da 28.7 m a 32 m Verrucano.

Ha un diametro di 8 cm, e il tratto filtrato va da 20 m a 32 m. Il monitoraggio di questo piezometro è stato svolto manualmente con cadenza mensile dal 26/11/2013 al 13/02/2014. Dal 01/03/2014 è stata installata una sonda dotata di data-logger che ha effettuato misure ogni 6 ore dei seguenti parametri: livello di falda, temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C.

Per quanto riguarda le fasi di monitoraggio in corso d'opera consultare la tabella in Fig. 11.1.

[Digitare il testo]

Piezometro A/P1

Il piezometro A/P1 si trova lungo la strada che collega l'impianto del "Petriolo Spa Resort" alla sorgente "Le Caldanelle di Petriolo" (Fig.11.15).



Fig.11.15-Piezometro A/P1. Foto del 06/11/2014.

Esso raggiunge una profondità di 47.5 m. La stratigrafia è costituita da: i primi 7 m sono composti da detrito, da 7 m a 30 m argille Galestri e Palombini, da 30 m a 35 m breccia, da 35 m a 42 m Calcere Cavernoso e da 42 m a 47.5 m Verrucano.

Ha un diametro di 20 cm, e il tratto filtrato riguarda l'intera estensione. Il monitoraggio di questo piezometro è stato svolto manualmente con cadenza mensile dal 26/11/2013 al 13/02/2014. Dal 01/03/2014 è stata installata una sonda dotata di data-logger che ha effettuato misure ogni 6 ore dei seguenti parametri: livello di falda, temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C.

Per quanto riguarda le fasi di monitoraggio in corso d'opera consultare la tabella in Fig. 11.1.

[Digitare il testo]

Piezometro C/P2

Il piezometro C/P2 si trova lungo la strada che collega l'impianto del "Petriolo Spa Resort" alla sorgente "Le Caldanelle di Petriolo" (Fig.11.16).



Fig.11.16-Piezometro C/P2. Foto del 06/11/2014.

Esso si sviluppa fino a una profondità di 72 m con la seguente successione di litologie: negli iniziali 6 m si ha detrito ricco di matrice limo-argillosa, da 6 m a 55 m Galestri e Palombini, da 55 m a 58.5 m breccia, da 58.5 m a 67 m Calcare Cavernoso e da 67 m a 72 m Verrucano.

Ha un diametro di 20 cm, e il tratto filtrato riguarda l'intera estensione. Il monitoraggio di questo piezometro è stato svolto manualmente con cadenza mensile dal 26/11/2013 al 13/02/2014. Dal 01/03/2014 è stata installata una sonda dotata di data-logger che ha effettuato misure ogni 6 ore dei seguenti parametri: livello di falda, temperatura e conducibilità elettrica specifica compensata a 21 °C.

Per quanto riguarda le fasi di monitoraggio in corso d'opera consultare la tabella in Fig. 11.1.

[Digitare il testo]

Capitolo 12 - Strumentazione e metodi

Durante la campagna di monitoraggio sono stati utilizzati differenti strumenti di prospezione idrogeologica e campionamento. Gli strumenti verranno descritti suddividendoli a seconda dell'utilizzo per monitoraggio discontinuo o in continuo.



Fig.12.1-Operazione di scarico dati dai sensori installati per il monitoraggio in continuo dei parametri: livello piezometrico, temperatura e conducibilità. Piezometro CP-2; foto del 06/11/2014.

Le campagne effettuate si svolgevano con la seguente procedura sui punti di monitoraggio:

- Scarico dei dati dai sensori installati per il monitoraggio in continuo tramite computer e connessione USB (Fig.12.1);
- Misura attraverso freatimetro del livello di falda per i piezometri (la misura serviva a verificare e calibrare il dato letto dal sensore in continuo);
- Misura della portata per le sorgenti con metodo volumetrico tramite contenitori tarati e cronometro;

[Digitare il testo]

- Azione di spurgo sui piezometri con pompa a 12 V, dotata di controllore a regolazione fine di flusso, collegata alla batteria del veicolo;
- Misura dei parametri in situ: pH, temperatura, conducibilità, potenziale redox, contenuto d'ossigeno in % e in mg/l tramite cella multi-parametrica (Fig.12.2);



Fig.12.2-Misura dei parametri *in situ* tramite cella multi-parametrica. Piezometro CP-2, foto del 06/11/2014.

12.1 Strumenti di campo per monitoraggio discontinuo

Gli strumenti di campo per il monitoraggio manuale utilizzati durante le campagne sono:

- Freatimetro a contatto elettrico con cavo da 50 m: “OTR OG 10” (Fig.12.3);
- Cella multiparametrica “YSI” 556 (Fig.12.4);
- Pompa a 12 V “MO-10500” (Fig.12.6);
- Controllore “*Booster II*” con regolazione fine del flusso (Fig.12.9).

[Digitare il testo]

Freatimetro



Fig.12.3- Freatimetro “OTR OG 10” da 50 m.

Il freatimetro a contatto elettrico è dotato di un cavo di 50 m dotato di sensore che produce un segnale acustico al contatto con l’acqua ed è impiegato per misurare il carico idraulico in foro.

Cella multi-parametrica



Fig.12.4-Cella multi-parametrica “YSI” 556.

La cella multi-parametrica è stata utilizzata per la misurazione in campo dei parametri *in situ* quali: pH, Temperatura, Conduttività elettrica Specifica (compensata a 21 C°), Redox, contenuto in Ossigeno in mg/l e in percentuale. In Tabella della Fig.12.5 sono indicate la risoluzione e precisione di misura per i vari parametri.

[Digitare il testo]

Parametro	Intervallo di misura	Risoluzione	Precisione
<i>pH</i>	0-141 unità pH	0.01 unità pH	± 0.2 unità pH
<i>Temperatura</i>	-5 – 45 °C	0.1 °C	± 0.15 °C
<i>Conducibilità</i>	0 – 100 mS/cm	0.001 mS/cm	0.5% della lettura in mS/cm
<i>Redox</i>	-999 – 999 mV	0.1 mV	± 20 mV
<i>Cont. Ossigeno (%)</i>	0 – 500 % saturazione	0.1% saturazione	Da 0 a 200% sat.: 2% sat.; da 200 a 500% sat.: 6% sat.
<i>Cont. Ossigeno (mg/l)</i>	0 – 50 mg/l	0.01 mg/l	Da 0 a 20 mg/l: 0.2 mg/l, da 20 a 50 mg/l: 0.6 mg/l

Fig.12.5- Tabella con risoluzione precisione di misura dei parametri analizzati dalla cella multi-parametrica “YSI” 556.

Pompa a 12 V “MO 10-500”

Pompa a 4 stadi che può raggiungere una prevalenza di 36 m collegandola al controllore *Power Booster II*, o all’analogo modello di Regolazione Fine di Flusso in grado di fornire 24 V. La velocità di spurgo risulta incrementata, ma con l’utilizzo del regolatore di flusso vengono rispettate le norme tecniche sul campionamento a basso flusso. Atta al funzionamento continuo, è parzialmente in grado di filtrare sabbie e detriti senza venire intasata o danneggiata. In Tabella relativa alla Fig.12.8 è mostrata la relazione fra prevalenza e portata.



Fig.12.6-Pompa a 12 V “MO-10500”.

[Digitare il testo]

Prevalenza 36 m									
Metri	1	3	6	12	18	21	27	33	36
Q l/min	17,4	16,6	15,9	13,2	8,7	7,9	6	4,7	3,8

Fig.12.8- Relazione fra prevalenza e portata della pompa a 12 V “MO-10500”.

Controllore “Booster II, PA 10750” con regolazione fine del flusso

Da utilizzare in combinazione con pompe ad alta prestazione consente di portare i 12 V di una normale batteria d’auto a 24 V costanti massimizzando quindi le potenzialità di esercizio delle pompe. Il dispositivo consente inoltre di ottenere un campionamento a basso flusso secondo le linee guida EPA sul campionamento in campo.



Fig.12.9-Controllore con regolazione fine di flusso “Booster II, PA 10750”.

[Digitare il testo]

12.2 Strumenti di campo per monitoraggio in continuo

Acqua Troll 200

Le sonde che sono state utilizzate per effettuare il monitoraggio in continuo sono gli “*Acqua Troll 200*” della compagnia statunitense “*In-Situ Inc.*” (Fig.12.10).



Fig.12.10-“Acqua Troll 200” e filtro ai carboni attivi.

Sono delle celle dotate di *data-logger* e sensori per effettuare misure periodiche dei parametri di temperatura, conducibilità elettrica e livello idrico.

Nel caso delle sorgenti il livello idrico è quello della vasca a monte dello stramazzo. I sensori sono forniti di una batteria autonoma. I dati vengono scaricati tramite una connessione USB fornito tramite *software* di gestione dedicato. La misura del livello idrico è compensata con la pressione atmosferica; vi è infatti un sensore di pressione che misura la colonna d’aria sovrastante e che è in connessione con l’aria tramite un filtro ai carboni attivi. Le specifiche tecniche sono riportate nelle Fig.12.11a e 12.11b.

[Digitare il testo]

Aqua TROLL 100 and 200 Instruments		
Temperature ranges¹	Operational: -5 to 50° C (23 to 122° F) Storage: -40 to 65° C (-40 to 149° F) Calibrated: 0 to 50° C (32 to 122° F)	
Max. pressure for Aqua TROLL 100	500 psi (1153 ft)	
Dimensions & weight	Diameter (OD): 1.83 cm (0.72 in). Length: 31.5 cm (12.4 in) Weight: 0.5 kg (1.0 lb)	
Materials	Titanium body and sensors, Delrin® nose cone, and PVC conductivity cell	
Output options	Modbus/RS485, SDI-12, and 4-20 mA	
Battery type & life²	3.6V lithium. 5 years or 200,000 readings ³	
External power	8-36 VDC	
Memory	4.0 MB	
Data records⁴	190,000	
Data logs	50	
Log types⁵	Linear, Linear Average, and Event	
Fastest logging rate	Linear: 1 per minute. Linear Average: 1 per minute. Event: 1 per second	
Fastest output rate	1 per second	
Conductivity Sensor	Type: Balanced 4-electrode cell	
Methods	EPA Method 120.1; Standard Methods 2510	
Range, accuracy, & resolution	Range: 5 to 100,000 µS/cm Accuracy: ±0.5% of reading + 1 µS/cm when reading less than 80,000 µS/cm ±1.0% of reading when reading above 80,000 µS/cm Resolution: 0.1 µS/cm	
Parameters supported⁶	<i>Range</i>	<i>Units</i>
Actual conductivity	5 to 100,000 µS/cm	µS/cm, mS/cm
Specific conductivity⁷	5 to 100,000 µS/cm	µS/cm, mS/cm
Salinity⁸	0 to 42 PSU	PSU
Total dissolved solids	0 to 82 ppt	ppt, ppm
Resistivity	10 to 200,000 Ohms-cm	Ohms-cm
Density (water salinity)	0.98 to 1.14 g/cm ³	g/cm ³

Fig.12.11a-Specifiche tecniche del conducimetro “Acqua Troll 200”.

[Digitare il testo]

Pressura/Level Sensor^d	Type: Piezoresistive. Pressure/level are available only on the Aqua TROLL 200 Instrument.	
Range	<i>Absolute (non-vented)</i> 30 psia: 10.9 m (35.8 ft) 100 psia: 60.0 m (197 ft) 300 psia: 200.7 m (658.7 ft) 500 psia: 341.3 m (1120 ft)	<i>Gauged (vented)</i> 5 psig: 3.5 m (11.5 ft) 15 psig: 11 m (35 ft) 30 psig: 21 m (69 ft) 100 psig: 70 m (231 ft) 300 psig: 210 m (692 ft) 500 psig: 351 m (1153 ft)
Burst pressure	Maximum 2x range; burst > 3x range	
Accuracy & resolution¹⁰	Accuracy @ 15° C: ±0.05% full scale (FS) ¹¹ Accuracy 0 to 50° C: ±0.1% FS ¹² Resolution: 0.005% FS or better	
Units of measure	Pressure: psi, kPa, bar, mbar, mmHg, inHg, cmH ₂ O, inH ₂ O. Level: in, ft, mm, cm, m	
Temperature Sensor		
Method	EPA Method 170.1	
Accuracy & resolution	Accuracy: ±0.1° C. Resolution: 0.01° C or better	
Units of measure	Celsius or Fahrenheit	
Warranty	2 years. Up to 5-year extended warranties available—please call for details.	

Fig.12.11b-Specifiche tecniche del sensore piezo-resistivo e del termometro “Acqua Troll 200”.

12.3 Calcolo portata e stramazzi

Il calcolo della portata delle sorgenti è stato effettuato tramite la misura del livello dell’acqua nella vasca di presa attraverso il sensore “Acqua troll 200”; il valore del livello è stato poi impiegato per il calcolo della portata fluente attraverso la luce dello stramazzo. La formula utilizzata è quella relativa agli stramazzi triangolari in parete sottile (Fig.12.12):

$$Q = \frac{8}{15} * \frac{tg\alpha}{2} * Cc * \sqrt{2g} * h_0^{\frac{5}{2}}$$

Dove:

α è l’angolo del vertice del triangolo, $\alpha = 90^\circ$;

Cc è il “coefficiente di contrazione” ricavabile da diagrammi per diversi valori di l_0/h_0 ;

g è l’accelerazione di gravità.

[Digitare il testo]

Lo stramazzo triangolare è indicato per la misura di portate caratterizzate da valori molto bassi.

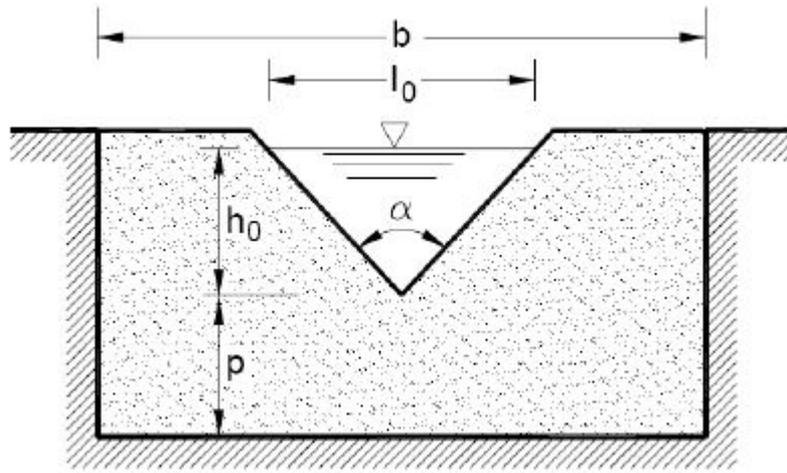


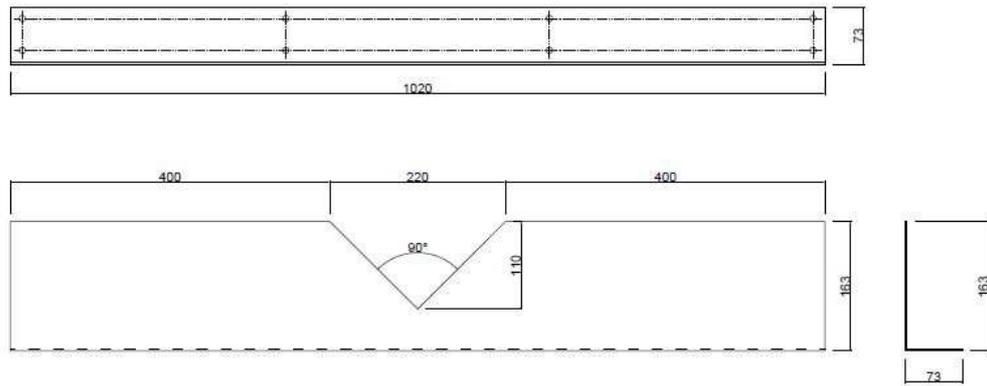
Fig.12.12- Schema stramazzo triangolare (E. Custodio, 2005).

Nelle Fig.12.13 e 12.15 vengono illustrati gli stramazzi installati nei punti di monitoraggio.



Fig. 12.13- Stramazzo sorgente "Porcarecchia". Foto del 13/03/2014.

[Digitare il testo]



**Fig.12.14- Schema tecnico dello stramazzo installato alla sorgente “Porcareccia”.
I valori numerici sono in mm.**



**Fig.12.15-Stramazzo installato alla sorgente “Le Caldanelle di Petriolo”. Foto del
06/11/2014.**

[Digitare il testo]

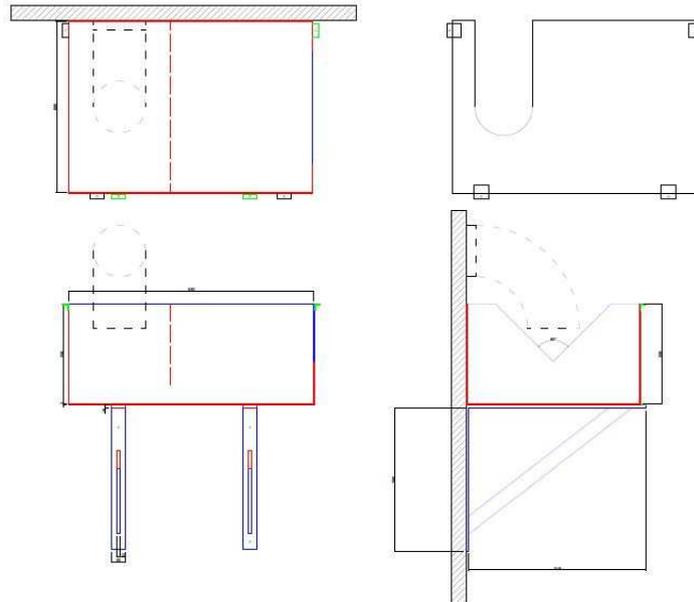


Fig.12.16- Schema tecnico dello stramazzo della sorgente “Le Caldanelle di Petriolo”. Partendo da in alto a sinistra vista da sopra, in basso a sinistra vista frontale, in basso a destra laterale.

[Digitare il testo]

Capitolo 13 – Dati pregressi

La raccolta dei dati pregressi si è indirizzata sulle tipologie di dati indicate qui di seguito. I dati sono stati impiegati, assieme a quelli raccolti per la presente tesi, per definire il modello idrogeologico concettuale e valutare il rischio di interferenza delle gallerie in progetto con il sistema idrogeologico.

Progetto

È stato possibile consultare parte del materiale riguardante il progetto esecutivo, ossia gli elaborati riguardanti:

- “Indagine e rilievi, geologia e idrogeologia” redatti da M. Fiocco – I. Ilardo, per conto di Strabag, 2012.
- “Idraulica, corografia di bacini” redatti per Strabag, 2012.

Il primo elaborato è composto da tavole rappresentanti i 7 quadri di riferimento del tracciato in cui viene illustrato il progetto, la litologia, le sorgenti, le emanazioni gassose, i punti di monitoraggio, i sondaggi, le stese sismiche, le sezioni geologiche ecc.. alla scala 1:2.000.

Nel secondo elaborato, invece, troviamo una carta topografica suddivisa in 2 quadri in scala 1:10.000 dove viene rappresentato il progetto e il reticolo idrografico, il bacino idrografico di riferimento con i sottobacini. Nei restanti elaborati, relativi all'idraulica, abbiamo la rappresentazione delle varie opere di regimazione idraulica a varie scale, 12 tavole rappresentanti il progetto e la superficie di bacino dei vari fossi intersecati dal tracciato (a scala 1:1.000) e le relazioni riguardanti lo studio idrogeologico dove vengono discussi la caratterizzazione dei bacini, l'interferenza tra il progetto e l'idrografia superficiale e le opere di drenaggio stradale.

[Digitare il testo]

Monitoraggio ante-operam

Per quanto riguarda i dati relativi al monitoraggio *ante-operam*, svolto da *Studio Mattioli s.r.l.* per le società *Strabag* e *Anas S.p.A.*, sono state consultate le seguenti relazioni:

- “Monitoraggio ambientale A.O. Relazione tecnica acque sotterranee”;
- “Monitoraggio ambientale A.O. Relazione tecnica acque superficiali”.

In queste due relazioni vengono illustrati, dopo un'introduzione sul progetto e sull'area interessata, i relativi monitoraggi *ante-operam* delle acque superficiali e sotterranee con l'elenco dei punti di monitoraggio, delle attività eseguite e dei risultati ottenuti.

Dati meteo

Il materiale relativo alle precipitazioni annue è stato scaricato dal sito del SIR, Servizio Idrogeologico Regionale della Toscana, relativo al trentennio dal 1985 al 2014 per quanto riguarda i dati della stazione pluviometrica di Pari [TOS03002789] - Civitella Paganico (GR). Per quanto riguarda i dati relativi alla temperatura del trentennio 1985 – 2014 sono stati scaricati dal sito “*ilmeteo.it*” e fanno riferimento alla stazione di Civitella Paganico (GR) a quota 329 m.l.m.

13.2 Metodologia di elaborazione dei dati di portata delle sorgenti

Per l'elaborazione dei dati ottenuti dal monitoraggio in discontinuo è stata utilizzata la metodologia di “classificazione delle sorgenti in base ai loro sistemi di flusso alimentanti”, descritta da Gargini et al. (2008) ed Ermini et al. (2009), elaborata in contesti generali di *hard rock aquifer* sedimentari (acquiferi torbiditici dell'Appennino settentrionale). Tale metodologia è basata sull'analisi della curva di esaurimento relativa ad una sorgente e permette l'individuazione della tipologia di sistemi di flusso alimentanti le varie scaturigini.

[Digitare il testo]

Se il sistema di flusso che alimenta una sorgente è di tipo profondo diviene maggiore la probabilità di un'interferenza idrogeologica da parte di un'opera in sotterraneo quale un tunnel.

Analisi idrologica dell'esaurimento

Il regime di portata in un acquifero fratturato è influenzato fondamentalmente dalla profondità del sistema di flusso, dalla distribuzione di permeabilità nell'ammasso roccioso e del regime della ricarica diretta (Freeze e Cherry, 1979; Halford e Mayer, 2000).

In tale tipologia di sistema, la portata di scarico dello stesso diventa in pratica uno specchio della ricarica, dal momento che esiste un passaggio più o meno veloce tra il segnale di input (precipitazioni) e quello di output (flusso di sorgente); solo durante la stagione di recessione, periodo di magra, dove la ricarica attiva è assente o molto ridotta, l'output di portata diventa completamente rappresentativo delle proprietà intrinseche dell'acquifero (Gargini et alii, 2008).

Classificazione delle sorgenti in base ai sistemi di flusso

Per le motivazioni illustrate si è scelto di effettuare una classificazione delle sorgenti basata sull'analisi dell'esaurimento estivo delle emergenze monitorate, da preferirsi ad una solamente basata sulla struttura idrogeologica secondo modelli concettuali predeterminati (Civita, 1973).

A partire dall'analisi della curva di esaurimento di una sorgente, che rappresenta, in linea generale, il tratto più regolare del segnale di scarico del sistema, si è quindi deciso di classificare le emergenze sulla base di un parametro, denominato *Base-yield* (B_y), il quale può essere considerato un indice empirico della produttività di una sorgente durante la recessione estiva (Ermini et alii, 2009).

[Digitare il testo]

Il parametro B_y , è definito come il prodotto, cambiato di segno, tra il logaritmo di base 10 del coefficiente di esaurimento e la portata media estiva della sorgente:

$$B_y = -[\log_{10}(\alpha) * Q_s]$$

dove Q_s è la portata media estiva espressa in (l/min) ed α è il coefficiente di esaurimento di recessione (1/g).

Il segno meno rende i valori di B_y positivi. Tale parametro tiene conto, in modo integrato, del flusso medio estivo della sorgente e del suo tasso di recessione: un alto valore di portata media estiva, combinato ad un basso tasso di diminuzione del flusso sorgentizio durante la magra, suggerisce che la produttività della sorgente è guidata da una cella di scarico maggiormente sviluppata (Gargini et alii, 2008), quindi più profonda e quindi più potenzialmente interferibile da un'opera in sottterraneo ove la idrostruttura favorisca la connessione.

Una volta definito il valore del Base-yield per le diverse sorgenti, esso può essere graficato in relazione alla quota relativa di emergenza delle sorgenti stesse, definita come differenza tra la quota m.s.l.m. delle emergenze ed il livello idrologico di base locale (rappresentato in genere dalla quota di base del torrente nel cui bacino recapita la sorgente). Il grafico così ottenuto (Fig.13.1) permette di definire almeno 5 campi o tipi di sorgenti (*spring-field*), classificandone e distinguendone la tipologia di acquifero (Gargini et alii, 2008).

[Digitare il testo]

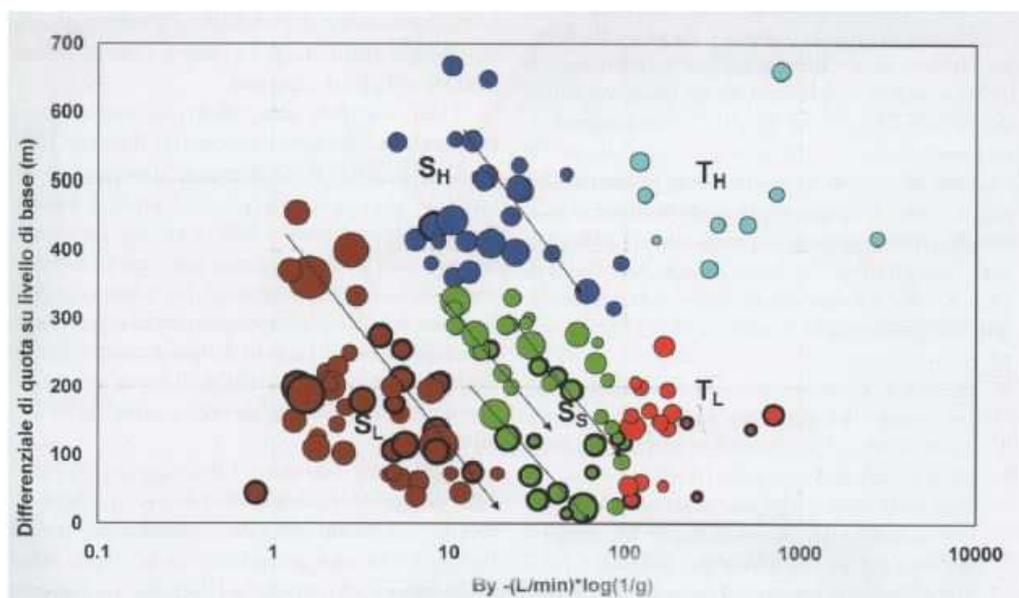


Fig.13.1- Campi di distribuzione del tipo delle sorgenti studiate in relazione al differenziale della quota di emergenza e al regime d'esaurimento, estratto dal lavoro di Ermini et al. (2009).

Questi 5 campi sono sostanzialmente espressione di 2 sistemi di flusso principali, indicati con le sigle S e T: il sistema S è suddiviso a sua volta in 3 campi: SS, SL;SH, mentre nel sistema T sono annoverati i campi TH e TL.

Le sigle S e T stanno rispettivamente per *Slope* (che indica un sistema di flusso locale o di versante o intrabacino) e *Trans-watershed* (ovvero un sistema di flusso regionale o trans-bacino); i pedici L e H indicano invece, rispettivamente, se si tratta di alta quota (*High*) o bassa quota (*Low*), mentre il pedice S è posto ad indicare la scala dell'intero versante. In generale si può affermare che i sistemi più a rischio risultano quelli regionali di bassa quota o eventualmente locali se la galleria ha scarsa copertura ed è scavata entro il versante..

[Digitare il testo]

Sistema locali di flusso di versante (intrabacino)

Questo sistema, che occupa nel grafico l'area in basso a sinistra con la sigla S_s , è caratterizzato da sorgenti di piccole e medie portate (al massimo 1 L/s in flusso di base). Tra le loro proprietà si riscontra una marcata tendenza all'aumento della portata estiva e alla diminuzione dell'IVP, ossia il rapporto tra la massima escursione di portata registrata e la portata media annua, al diminuire della quota d'emergenza. Il sistema di flusso è sviluppato lungo un versante quindi non s'espande al di fuori del bacino idrografico.

Sistemi locali di flusso di minor grado gerarchico

Rispetto ai sistemi di flusso di versante sono meno importanti perché occupano aree minori. Si suddividono in sistemi di flusso locale ad alta quota S_h e bassa quota S_l , spesso sono legati a circolazioni in accumuli di frana e corpi detritici. Si tratta pertanto acquiferi isolati e versanti di ridotte dimensioni.

Sistemi di flusso regionali

I sistemi di flusso regionali sono quelli di maggiore importanza, i quali si sviluppano su ampia scala, maggiore dei singoli bacini idrografici. Essi sono tutti sgorganti da rocce e alimentati da discontinuità tettoniche con valori di IVP < 1.3 con bassa velocità d'esaurimento della risorsa idrica. Questa categoria si suddivide pure in sistemi d'alta e bassa quota. I primi, considerati un'anomalia nei confronti della locazione, hanno valori d'IVP e coefficiente d'esaurimento bassissimi. I secondi sono caratterizzati da portate elevate, bassi IVP, coefficiente d'esaurimento compreso fra 1 e $6 \times 10^{-3} g^{-1}$ e EC media di 600 $\mu S/cm$.

[Digitare il testo]

PARTE IV – PRESENTAZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

Al fine di verificare la potenziale interferenza idrogeologica relativa alla costruzione delle gallerie “Casal di Pari” e “Greppoli” è stato svolto uno studio di monitoraggio. Il monitoraggio da noi svolto è relativo al periodo in corso d’opera (periodo inizio Novembre-Dicembre 2013 ed ancora in atto). In questo studio verranno analizzati i dati fino al 15/01/2015 per motivi pratici. Durante lo studio sono state monitorate da parte nostra 2 sorgenti e 7 piezometri per conto di *Studio Mattioli s.r.l.* e considerati i dati relativi ad altre 6 sorgenti monitorate dalla società *Ambiente ingegneria ambientale e laboratori* delle quali sono disponibili anche dati raccolti nel periodo *ante-operam*.

Capitolo 14 – Presentazione dei dati del monitoraggio *ante-operam*

Il monitoraggio *ante-operam* nell’area d’interesse ha preso in esame punti d’acqua superficiali e sotterranei. Per le acque superficiali sono state monitorate 2 stazioni per il Torrente Farma e 2 stazioni per il Fosso della Rilucia, una a monte e una a valle rispetto le aree soggette a cantierizzazione (vada cap. 10.1) dove sono state effettuate misure della portata. Le misure sono state eseguite attraverso il metodo correntometrico mediante mulinello meccanico intestato su asta. Per quanto riguarda le acque sotterranee è stato svolto su 7 sorgenti. In Fig.14.1 sono illustrate le date del monitoraggio *ante-operam* delle acque superficiali.

Monitoraggio ante-operam acque superficiali					
T. Farma			F. Rilucia		
Portata m ³ /s			Portata m ³ /s		
data	ASP06 (Monte)	ASP01 (Valle)	data	ASP05 (Monte)	ASP02 (Valle)
28/06/2012	0.073	0.047	28/06/2012	secco	secco
20/09/2012	0.088	0.055	12/09/2012	secco	secco

Fig.14.1- Tabella monitoraggio acque superficiali in fase *ante-operam* con i risultati delle misure di portata.

[Digitare il testo]

Come si può vedere dalla tabella in Fig. 14.1 il monitoraggio *ante-operam* delle acque superficiali si è svolto in 2 campagne eseguite nel periodo estivo dell'anno 2012.

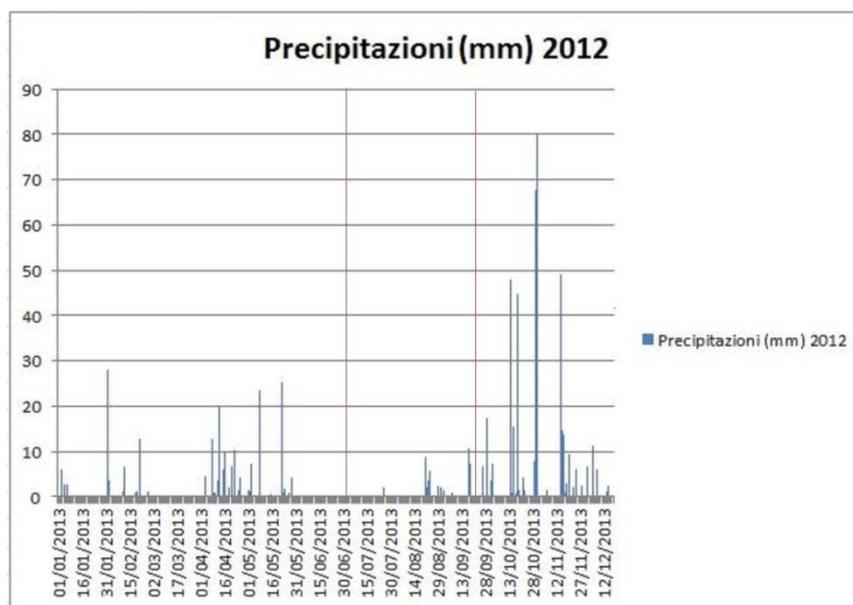


Fig. 14.2- Grafico delle precipitazioni giornaliere relative all'anno 2012, in rosso sono segnate le date corrispondenti alle misure di portata del T. Farma. Dati relativi alla stazione pluviometrica di Pari-Civitella Paganico.

Osservando il grafico in Fig. 14.2 si può affermare che le misure di portata relative alle stazioni del T. Farma sono state inficiate da piogge relativamente alla misura di Settembre dove la precipitazioni attorno alla metà del mese, seppur lievi, resituiscono un valore di portata a Settembre che è maggiore del valore di Giugno, cosa non logica da un punto di vista idrologico. Detto questo vi è inoltre un evidente calo di portata da monte a valle, non imputabile ad un mero margine di errore dovuto alla misura correntometrica. Essendo il tratto in questione dell'alveo del T. Farma non soggetto a derivazioni ed imposto nel Verrucano che si contraddistingue per le sue scarse proprietà di circolazione idrica risulta improbabile che il dato sia veritiero. Questo induce a pensare a un errore nella misurazione della portata i cui dati quindi non vengono considerati validi.

[Digitare il testo]

Si nota invece che il Fosso della Rilucia nel periodo estivo relativo all'anno 2012 ha raggiunto condizioni critiche senza acqua. Il Fosso della Rilucia, pertanto, non è alimentato da un deflusso di base significativo per cui non ha importanza per le valutazioni di potenziale interferenza idrogeologica sulle gallerie.

In Fig.14.3 sono illustrati i dati relativi al monitoraggio *ante-operam* delle acque sotterranee.

Monitoraggio ante-operam acque sotterranee						
Sorgenti						
Portata L/min						
data	AST01	AST02	AST04	AST05	AST06	AST10
26/07/2012	n.r	\	\	\	\	n.r
21/08/2012	\	n.r	6	1.5	\	\
20/09/2012	\	\	\	\	n.r	\
16/04/2013	14.5	5.5	9	2.5	n.r	15

Fig.14.3-Tabella monitoraggio acque sotterranee in fase *ante-operam* con i risultati delle misure di portata. La sigla “n.r.” indica che la portata non era determinabile.

Dalla tabella in Fig.14.3 si può vedere come le sorgenti monitorate nell'area durante il periodo *ante-operam* (per la localizzazione vedere Cap.11.1) siano tutte caratterizzate da portate limitate e spesso addirittura non misurabili causa lo scarso flusso di acqua. Più precisamente per i casi di portata non determinabile le motivazioni, a parte per la sorgente AST 01 di cui la causa non è specificata, sono le seguenti: nel caso di AST 02 la motivazione è che non è stata individuata per probabile gestione dell'acquedotto Fiora, AST 06 è risultata non determinabile perché “alimentata dal basso in una vasca naturale permanente” e AST 10 perché utilizzata dalle terme dei Bagni di Petriolo.

Le sorgenti misurate sono tutte impostate nella formazione del Verrucano che di fatto è considerato come un acquitardo dove la circolazione idrica è limitata solamente alle porzioni o fasce interessate da fratturazione o è limitata al mantello di alterazione superficiale. Questo è da considerare il motivo delle basse portate di queste sorgenti. Non è stato possibile effettuare alcuna analisi dell'esaurimento estivo. Laddove disponibile il valore della portata in morbida (sorgenti AST 04, AST 05) è circa il 50% maggiore rispetto al valore di magra (1 volta e mezzo circa).

[Digitare il testo]

Capitolo 15 – Presentazione ed elaborazione dati dei punti d’acqua monitorati in corso d’opera

Il monitoraggio in corso d’opera è iniziato a Novembre 2013 ed è tutt’ora in corso. I dati presi in esame in questo studio coprono l’arco di tempo che va da Novembre 2013 al 15/01/2015 causa il tempo necessario alla raccolta ed elaborazione dei dati. Verranno prima descritte generalmente le sorgenti e successivamente, dopo la presentazione dei grafici, classificate le sorgenti tramite la metodologia di “classificazione delle sorgenti in base ai loro sistemi di flusso alimentanti”, descritta da Gargini et al. (2008) ed Ermini et al. (2009). Questa metodologia può essere applicata solamente alle sorgenti che non si esauriscono durante il periodo di recessione estiva e per quelle sorgenti di cui sono disponibili almeno tre misure della portata relative al periodo di esaurimento. Pertanto le sorgenti a cui è stato possibile applicare questa classificazione sono: “Le Caldanelle di Petriolo”, “Porcareccia”, “AST05” e “AST06”.

Descrizione e classificazione delle sorgenti

Le sorgenti dell’area di studio verranno ora descritte sinteticamente attraverso vari parametri. I parametri presi in considerazione sono: la portata media annua Q_m , sulla quale si basa la classificazione di Meinzer (1927), la quale suddivide le sorgenti in 8 classi di portata; la portata media estiva Q_s , relativa al deflusso di base della sorgente; l’indice IVP, indice di variabilità della portata, calcolato dal rapporto tra la massima escursione di portata registrata e la portata media annua:

$$IVP = (Q_{max} - Q_{min})/Q_m$$

il coefficiente d’esaurimento α , la conducibilità elettrica specifica CE compensata a 21 °C e la temperatura in gradi °C.

Tra le 8 sorgenti monitorate in corso d’opera solo su 4 è possibile eseguire tale descrizione per la mancanza di dei dati necessari nelle restanti.

Le sorgenti che hanno un sufficiente numero di dati sono: “Le Caldanelle di Petriolo”, “Porcareccia”, “AST 05” e “AST 06”.

[Digitare il testo]

Nome	Unità	Quota (m s.l.m.)	Anno	Qm L/min	Classe di Meinzer	Qs L/min	IVP	α (1/g)	T °C	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ 21°C)	Tipo
Caldanelle	CV	200	2014	505.8	IV	409.73	1.31	0.004	35.42	1,688	TL
Porcareccia	Ve	341	2014	59.4	V	54.98	1.17	0.006	13	196.71	TL
AST05	Ve	185	2014	1.08	VII	1.14	0.37	0.004	\	\	SL
AST06	Ve	175	2014	6.1	VI	3.38	0.18	0.002	\	\	SL

Fig.15.1- Tabella descrittiva delle sorgenti presenti nell'area di studio. Parametri: Qm portata media annua; Qs portata media estiva; IVP indice di variabilità della portata; α coefficiente d'esaurimento; T temperatura in gradi °C; CE conducibilità elettrica compensata a 21 °C; Tipo indica lo *spring-field* (secondo Gargini et al., 2008)

Dai dati riportati in tabella in Fig.15.1 si può notare, come previsto, che il sistema di flusso di maggiore importanza si sviluppa nell'acquifero carsico del Calcare Cavernoso mentre le sorgenti AST05 e AST06, impostate nell'acquifero del Verrucano, hanno portate limitate per via della sua scarsa capacità di circolazione idrica legata principalmente allo scarso grado di fratturazione dello stesso. Quello che risalta è la portata della sorgente "Porcareccia" che, sebbene impostate nel Verrucano, presenta significativi valori di portata. La motivazione di tale portata verrebbe da attribuire alla presenza di qualche struttura tettonica, come una faglia, che funge da via preferenziale e richiami maggiori quantità d'acqua aumentando la capacità di circolazione. Dall'esame della cartografia geologica non vi è presenza di una tale struttura. In campagna la fitta copertura boschiva ostacola il rilevamento di superficie. Non è da escludere il contributo del cappellaccio di alterazione e detensionamento superficiale dell'ammasso roccioso.

[Digitare il testo]

15.1 Sorgenti monitorate in discontinuo

In Fig.15.2 vengono illustrati i dati relativi alle sorgenti monitorate in discontinuo. Sono le stesse 6 sorgenti monitorate in *ante-operam* e tutte scaturenti dalla Formazione del Verrucano..

Monitoraggio in corso d'opera acque sotterranee						
Sorgenti						
Portata L/min						
data	AST01	AST02	AST04	AST05	AST06	AST10
23/12/2013	\	\	0	1	10	600
21/01/2014	\	\	0	1	11	650
12/02/2014	\	\	20	1	12	n.r.
19/03/2014	60	n.r.	18	1	10	480
24/04/2014	\	\	9	1	5	540
25/05/2014	n.r.	n.r.	2	1.4	4.1	n.r.
18/06/2014	60	\	0	1.2	3.5	n.r.
16/07/2014	\	\	0	1.1	3.3	n.r.
20/08/2014	n.r.	n.r.	0	1	3	n.r.
23/10/2014	n.r.	n.r.	0	1	3	n.r.

Fig.15.2-Tabella monitoraggio acque sotterranee in corso d'opera da parte della società *Ambiente ingegneria ambientale e laboratori*. La sigla n.r. indica che la portata non era determinabile, mentre “\” che non è stata fatta la misura.

I motivi per cui le portate risultano non determinabili in alcuni casi sono gli stessi elencati per la tabella in Fig.14.3.

Fra le sorgenti si può notare una netta differenza tra la portata di AST 01 e AST 10, da una parte, rispetto a quella delle altre (assai più piccole).

La sorgente AST 10 è una sorgente riconducibile a una circolazione profonda la cui risalita sfrutta la faglia inversa presente in area (Fig.15.3). Questa faglia è di tipo inverso e immerge a est mettendo in contatto tettonico la formazione del Verrucano con i Galestri e Palombini che viene a trovarsi parzialmente sovrapposto alla prima. Sia la formazione del Verrucano che dei Galestri e Palombini sono considerate acquitardi per la loro scarsa conducibilità idraulica, nel Verrucano variabile fra 10^{-6} e 10^{-7} m/s e nei Galestri e Palombini inferiore alla precedente.

[Digitare il testo]

Considerando comunque il Verrucano come complesso a permeabilità maggiore tra i due si può parlare nel caso della sorgente AST 10 di “soglia di permeabilità sovrainposta” (Civita, 2005) per accavallamento parziale dei Galestri e Palombini sul Verrucano. Le sorgenti per “soglia di permeabilità” sono strutture idrogeologiche diffuse nelle aree montuose interessate da fenomeni tettonici, appunto come sovrascorrimenti, dove una formazione a permeabilità relativa più bassa (acquitardo) si sovrappone parzialmente all’acquifero in questione, il quale sussiste in profondità nell’area più o meno a valle della soglia di permeabilità. Si genera così uno sbarramento idraulico dovuto al netto cambio del grado di permeabilità che provoca l’aumento del livello piezometrico dell’acquifero fino alla quota del punto altimetricamente più basso di una soglia di permeabilità (Civita 2005).

La sorgente AST 10 è sfruttata dai “*Bagni di Petriolo*”, motivo per cui potrebbe risultare non determinabile in più campagne e, in fase di monitoraggio *ante-operam*, ha registrato una portata di soli 15 L/min rispetto ai 540 L/min nella campagna di monitoraggio in corso d’opera (relativamente allo stesso periodo dell’anno). Per quanto riguarda la sorgente AST 01 la portata maggiore, dell’ordine dei 60 L/min, si può ipotizzare che sia dovuta a una fascia di Verrucano maggiormente fratturata e/o alterata per il passaggio nell’area di un sistema di faglie (Fig.15.4). Essa emerge da una copertura detritica incoerente di versante posta sulla formazione del Verrucano in un area dove abbiamo importanti faglie inverse che mettono a contatto il Verrucano, che viene a trovarsi sottoposto, con i Galestri e Palombini. Si potrebbe ipotizzare quindi che anche questa sorgente sia una “soglia di permeabilità sovrainposta” (Civita, 2005), con i Galestri e Palombini parzialmente sopra il Verrucano.

Resta da dire che confrontando i dati del monitoraggio *ante-operam* con il monitoraggio in corso d’opera si nota che le portate relative alle sorgenti AST 01 e AST 10 non sono confrontabili tra le due fasi.

Nel primo caso si passa da 14.5 L/min misura del 16/04/2013 a 60 L/min misura del 19/03/2014, nel secondo caso da 15 L/min misura del 16/04/2013 a 540 L/min misura del 24/04/2014.

[Digitare il testo]

Appare evidente come il monitoraggio *ante-operam* sia caratterizzato da evidenti limiti tecnici per cui il dato idrogeologico più significativo sarà quello relativo al monitoraggio in corso d'opera.

Le restanti sorgenti di portata ridotta sono congrue con la permeabilità media dell'ammasso roccioso in cui sono impostate.

Questo induce a non considerare i dati del monitoraggio *ante-operam* per entrambe le sorgenti. Nel caso della sorgente AST 10 la sottostima della portata potrebbe essere dovuta a una parziale captazione da parte dei “Bagni di Petriolo”.

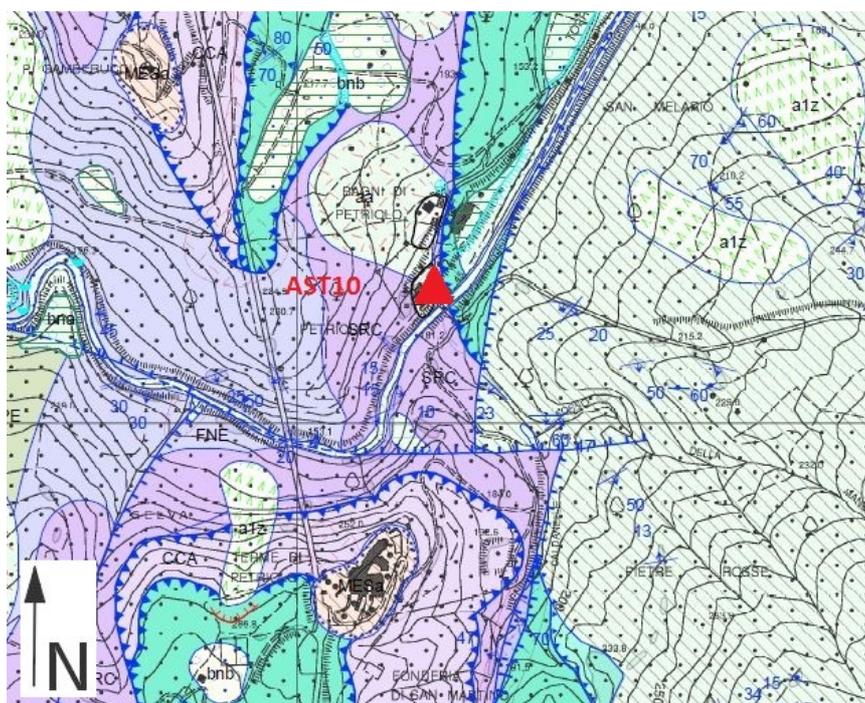


Fig.15.3-Estratto della carta geologica regionale SEZIONE 307120 (Fig.4.6) con evidenziata in rosso la ubicazione della sorgente AST10 presso i Bagni di Petriolo; in blu i sistemi di faglie.

[Digitare il testo]

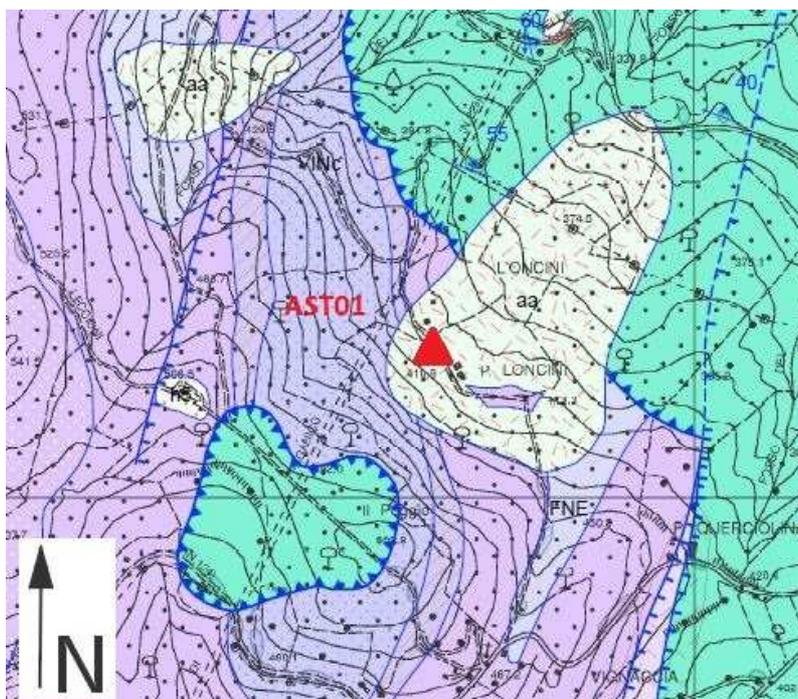


Fig.15.4-Estratto della carta geologica regionale SEZIONE 307120 (Fig.4.6), con evidenziata in rosso la ubicazione della sorgente AST01;in blu i sistemi di faglie.

Nel seguente paragrafo verranno rappresentati i grafici relativi ai punti d'acqua che sono stati soggetti del monitoraggio in corso d'opera, ossia 5 sorgenti (delle restanti 3 non si hanno sufficienti dati) e 7 piezometri.

Per quanto riguarda le sorgenti saranno illustrati gli idrogrammi di portata, dove è operato un confronto con le precipitazioni, e gli andamenti della temperatura e conducibilità elettrica compensata a 21°C. Per i piezometri gli idrogrammi riguarderanno il carico idraulico assieme alla temperatura e conducibilità elettrica compensata a 21°C.

Nei grafici il monitoraggio in discontinuo è rappresentato da una spezzata, quello in continuo invece ha un andamento più regolare.

I dati relativi alle precipitazioni e alla temperatura sono gli stessi utilizzati per l'inquadramento climatico (vedi Cap.3).

[Digitare il testo]

15.2 Elaborazione dati sorgenti monitorate in corso d'opera

Sorgente “Le Caldanelle di Petriolo”

Questa sorgente è classificata come sorgente per “soglia di permeabilità sovrainposta” (Civita, 2005) trovandosi il Calcere Cavernoso a contatto tramite faglia diretta immergente a W con la formazione dei Galestri e Palombini, unità decisamente meno permeabile. Quest'ultima faglia denominata “Faglia delle Caldanelle” è ritenuta la responsabile della risalita dei fluidi termali (vedi Fig.15.5)

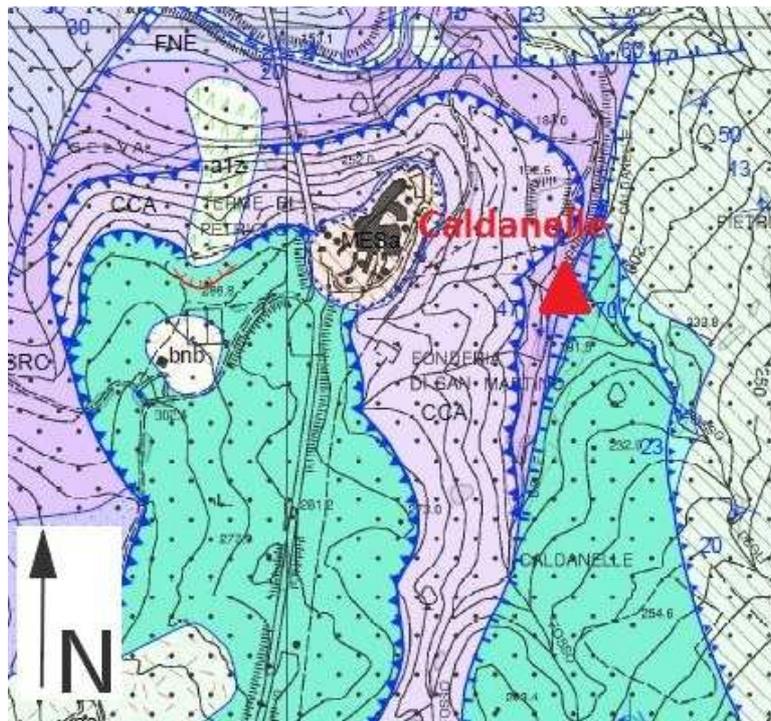


Fig.15.5-Estratto della carta geologica regionale SEZIONE 307120 (Fig.4.6) con evidenziata in rosso la ubicazione della sorgente “Le Caldanelle di Petriolo”.

[Digitare il testo]

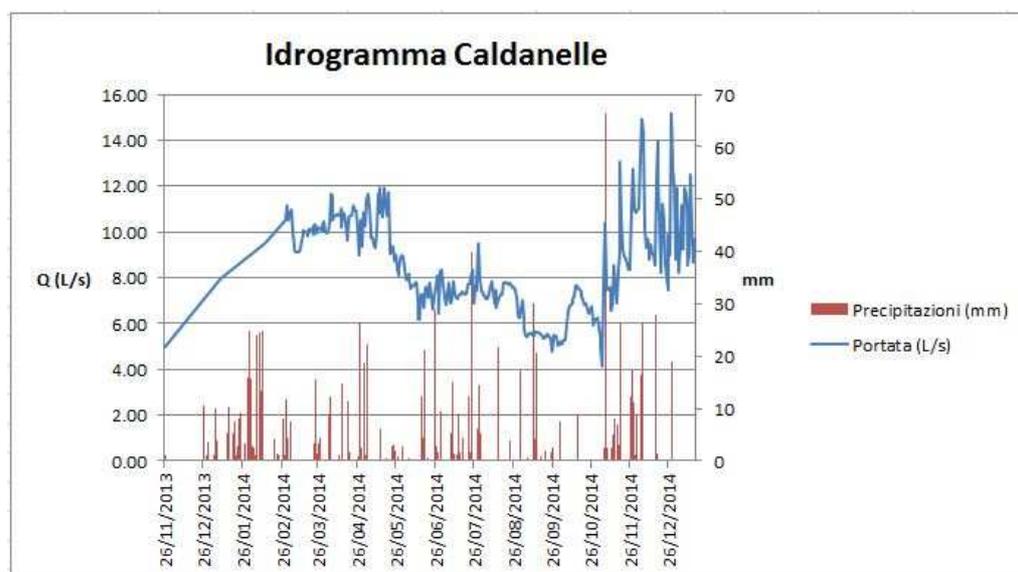


Fig.15.6- Idrogramma della sorgente “Le Caldanelle di Petriolo” .Il monitoraggio in continuo inizia a partire dal 01/03/2014.

Dal grafico in Fig.15.6 si può osservare l’andamento della portata in L/s relativa alla sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*”.

Si può notare che, nonostante sia una sorgente termale associata a una circolazione profonda, essa segue comunque un comportamento stagionale soggetto ad un periodo di ricarica e ad un periodo di magra risultando quindi influenzata dalla ricarica meteorica e rispondendo all’input di precipitazione.

In particolare si può distinguere il periodo d’esaurimento che parte da metà Maggio e dura fino a fine Ottobre. Nel periodo di ricarica di fine Novembre inizio Dicembre, in cui si ha la più alta concentrazione di precipitazioni, si può vedere, confrontando la portata con le precipitazioni, la loro evidente correlazione temporale. La portata massima registrata è di 15.2 L/s ed è relativa a fine Dicembre mentre la portata minima registrata è di 4.16 L/s ai primi di Novembre (termine dell’anno idrologico 13/14 ed inizio del 14/15). L’andamento generale quindi è riconducibile a un sistema di flusso soggetto a ricarica ed esaurimento stagionali su larga scala ma anche soggetto a sbalzi rilevanti dei valori della portata soprattutto nel periodo di ricarica.

[Digitare il testo]

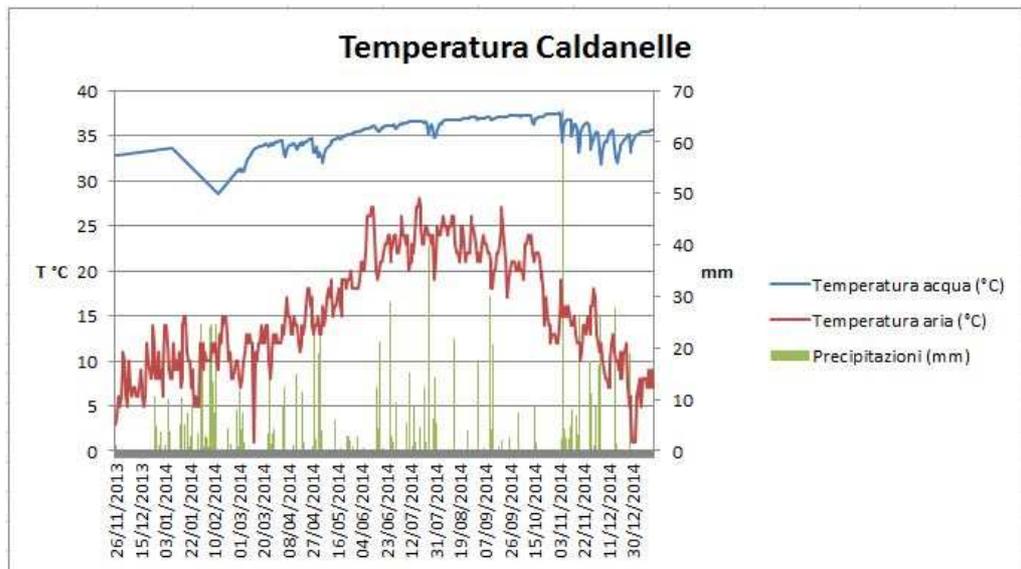


Fig.15.7- Grafico della temperatura dell'acqua della sorgente "Le Caldanelle di Petriolo". Il monitoraggio in continuo inizia a partire dal 01/03/2014.



Fig.15.8-Grafico della conducibilità elettrica della sorgente "Le Caldanelle di Petriolo". Il monitoraggio in continuo inizia a partire dal 01/03/2014.

La temperatura dell'acqua, osservabile nel grafico di Fig.15.7, permette di collocare la sorgente a cavallo tra le acque sorgive ipotermali (20°C-35°C) e quelle mesotermali (35°C-50°C) andando da un minimo di 28.5°C registrata a metà Febbraio a un max di 37.5°C registrata a fine Ottobre. La temperatura media è di 35.4°C. Come si può vedere dal grafico in Fig.15.7 la temperatura della sorgente non subisce particolarmente l'influenza degli input di ricarica, nè risente della variazione climatica stagionale mantenendo la sua temperatura elevata. Vi è comunque un lieve effetto di raffreddamento episodico durante la stagione di ricarica di Novembre-Dicembre.

[Digitare il testo]

Per quanto riguarda la conducibilità elettrica essa ha un valore medio di 1688 uS/cm, evidentemente influenzata dai fenomeni profondi. Questo può essere dovuto al fatto che essendo un'acqua sorgiva termale di circolazione profonda il suo ciclo idrogeologico è molto lungo e quindi sarà maggiore il suo contenuto di ioni. Essa comunque risulta essere molto variabile, probabilmente per l'effetto dovuto al mescolamento con acque di ricarica dato che i valori più bassi sono registrati nei periodi di più intense precipitazioni.

Sorgente "Porcareccia"

La "Porcareccia" viene classificata come sorgente per "limite di permeabilità indefinito" (Civita 2005) trovandosi in un complesso litologicamente omogeneo, il Verrucano, ed essendo quindi associata a una zona a permeabilità maggiore rispetto all'intorno dovuta a una maggiore fratturazione.

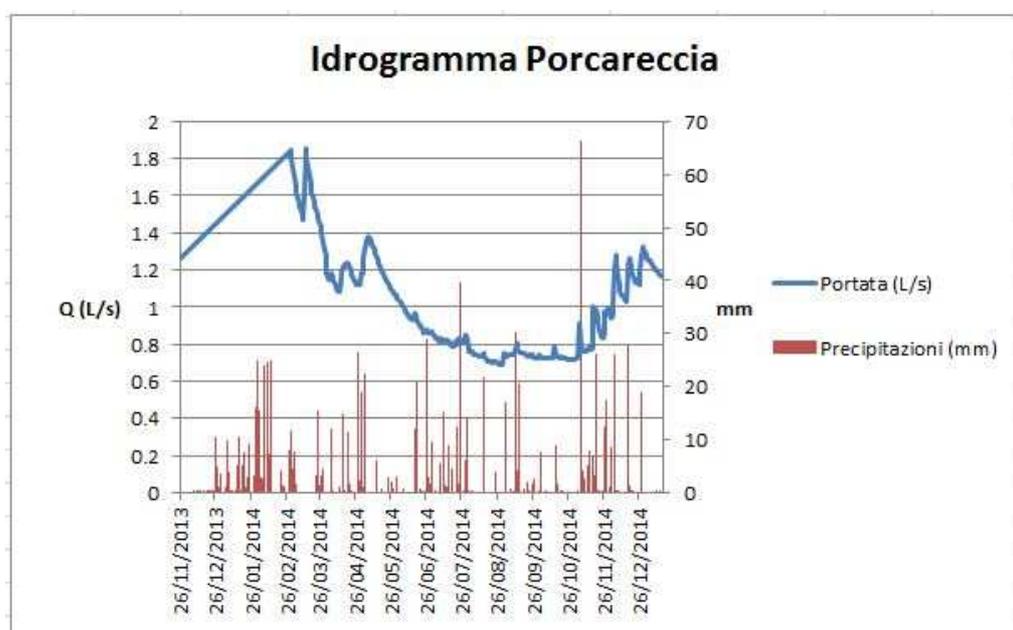


Fig.15.9- Idrogramma della sorgente "Porcareccia". Il monitoraggio in continuo inizia a partire dal 01/03/2014.

[Digitare il testo]

Dal grafico in Fig.15.9 relativo alla portata della sorgente “*Porcareccia*”, si possono chiaramente individuare 4 periodi distinti, tipici del regime delle sorgenti appenniniche alimentate da acquiferi a permeabilità medio-bassa: il periodo di ricarica principale che ricade nella stagione autunnale, in questo caso da fine Ottobre a fine Gennaio, seguito da un periodo di magra relativa nei mesi di Febbraio-Marzo e da un periodo di morbida in Aprile legato alle piogge primaverili. Successivamente, dall’inizio di Maggio, ha inizio il periodo d’esaurimento che dura fino alla fine di Ottobre dove ha inizio la ricarica dell’anno idrologico successivo. Si può affermare che la circolazione del sistema di flusso che la alimenta sia tendenzialmente superficiale. La portata max registrata è di 1.85 L/s a metà Marzo mentre la portata minima è di 0.69 L/s registrata a fine Agosto. La portata media è di 0.99 L/s.

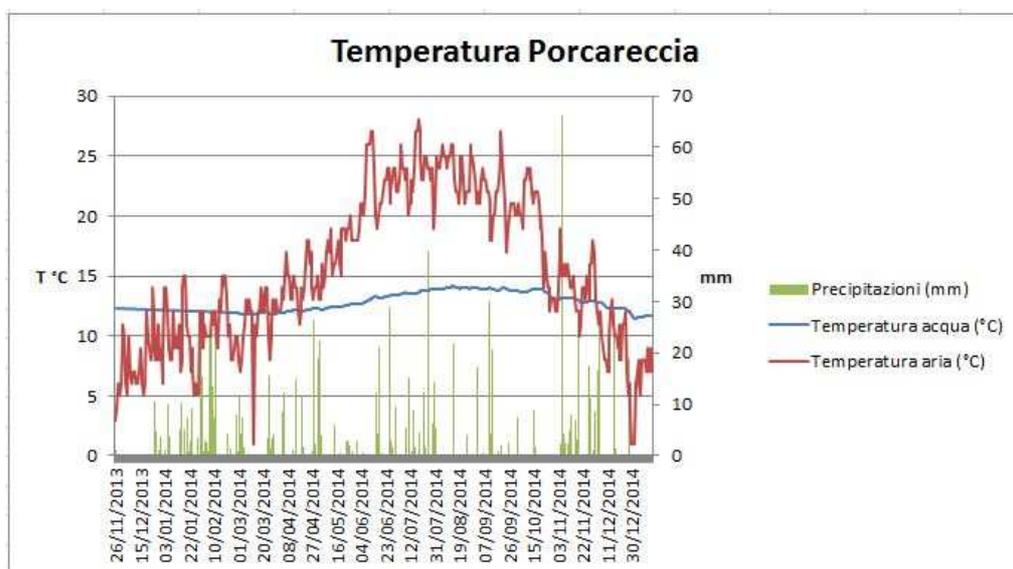


Fig.15.10- Grafico della temperatura dell’acqua della sorgente “Porcareccia”. Il monitoraggio in continuo inizia a partire dal 01/03/2014.

[Digitare il testo]

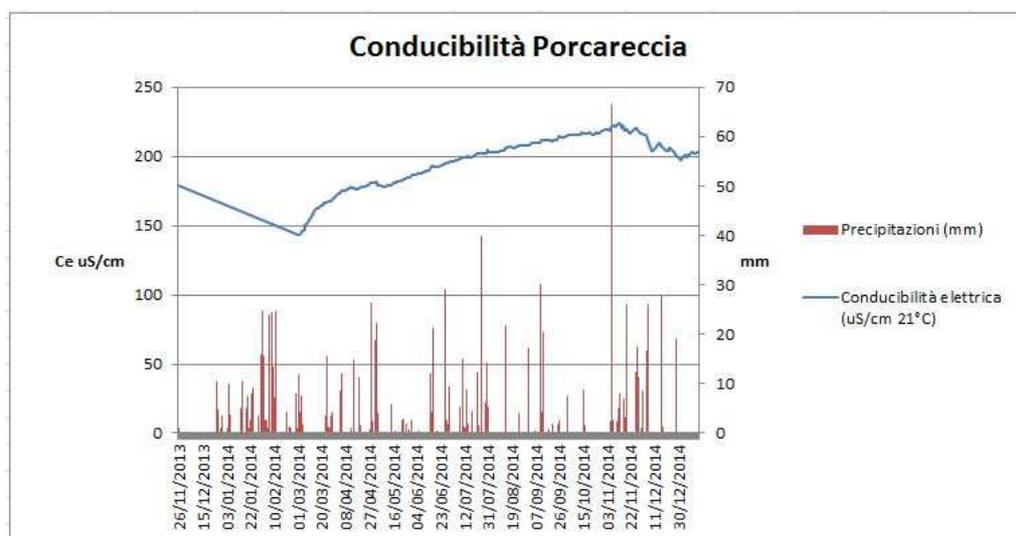


Fig.15.11- Grafico della conducibilità elettrica della sorgente “Porcareccia”. Il monitoraggio in continuo inizia a partire dal 01/03/2014.

In base alla temperatura la sorgente “*Porcareccia*” viene classificata come fredda (< 20°C). La sua temperatura media è di 13°C, quella max di 14.0 registrata ad Agosto e quella minima di 11.5°C registrata a Dicembre. La conducibilità elettrica media compensata a 21°C è di 196.71 uS/cm. Dall’andamento della portata e della temperatura si può affermare che l’acqua della sorgente “*Porcareccia*” sia di circolazione superficiale connessa al ciclo idrologico.

AST 04

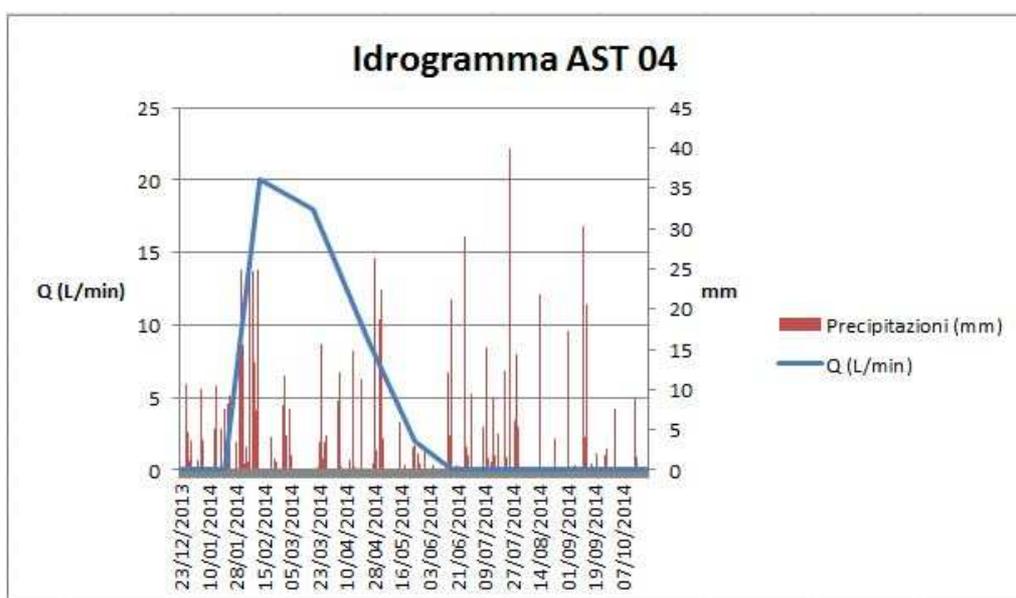


Fig.15.12- Idrogramma della sorgente AST 04. Monitoraggio in discontinuo.

[Digitare il testo]

Dal grafico in Fig.15.12 si nota che la sorgente AST 04 sembra rispondere agli input delle precipitazioni nella stagione di morbida, periodo di fine Febbraio, ma nel resto del grafico il comportamento è indipendente dalle precipitazioni ed addirittura la sorgente si prosciuga del tutto in estate. Per visualizzare la campagna di monitoraggio discontinuo nel dettaglio consultare la tabella in Fig.14.4.

AST 05

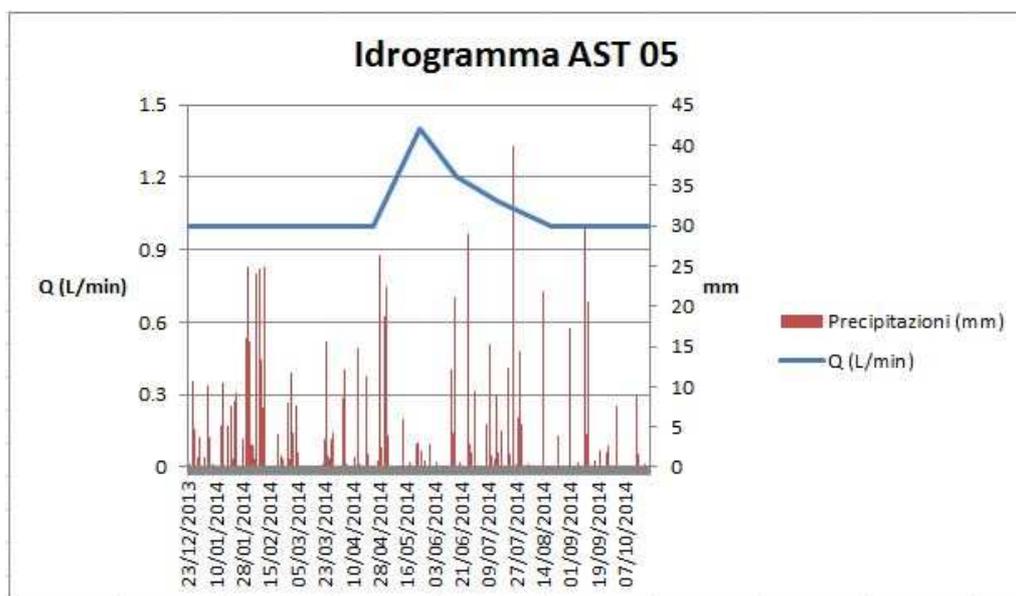


Fig.15.13- Idrogramma della sorgente AST 04. Monitoraggio in discontinuo.

La sorgente AST 05 sembra aver un comportamento indipendente dalle precipitazioni con le quali non si nota nessuna correlazione. Per visualizzare la campagna di monitoraggio discontinuo nei dettagli consultare la tabella in Fig.14.4.

[Digitare il testo]

AST 06

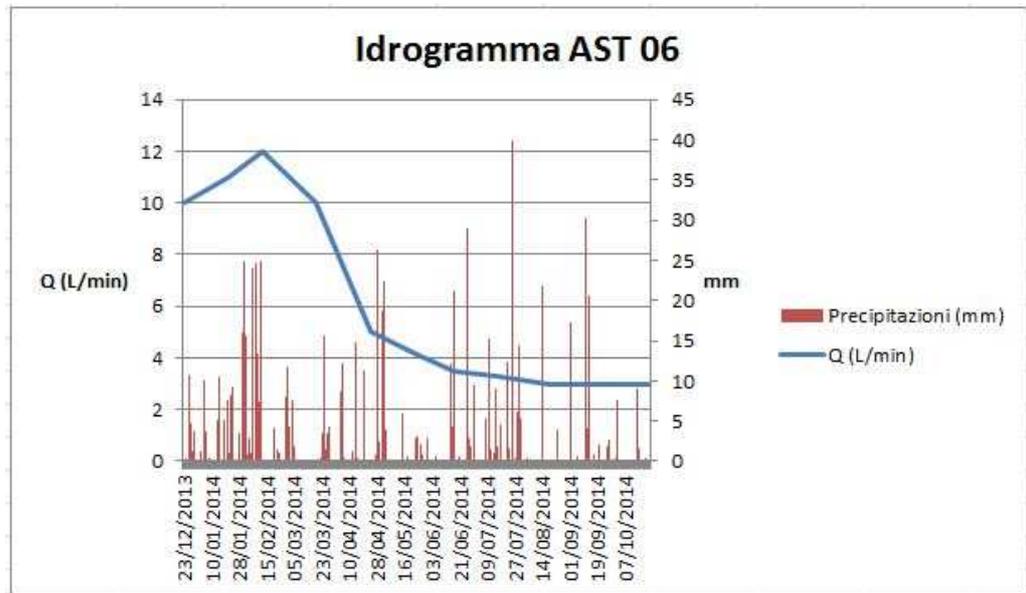


Fig.15.14- Idrogramma della sorgente AST 06. Monitoraggio in discontinuo.

Nella sorgente AST 06 si può vedere chiaramente la curva d'esaurimento preceduta da un periodo di morbida corrispondente con gli input delle precipitazioni, nel periodo di Febbraio. Per visualizzare la campagna di monitoraggio discontinuo nel dettagli consultare la tabella in Fig.14.4.

15.3 Elaborazione dati piezometri

Piezometro S1

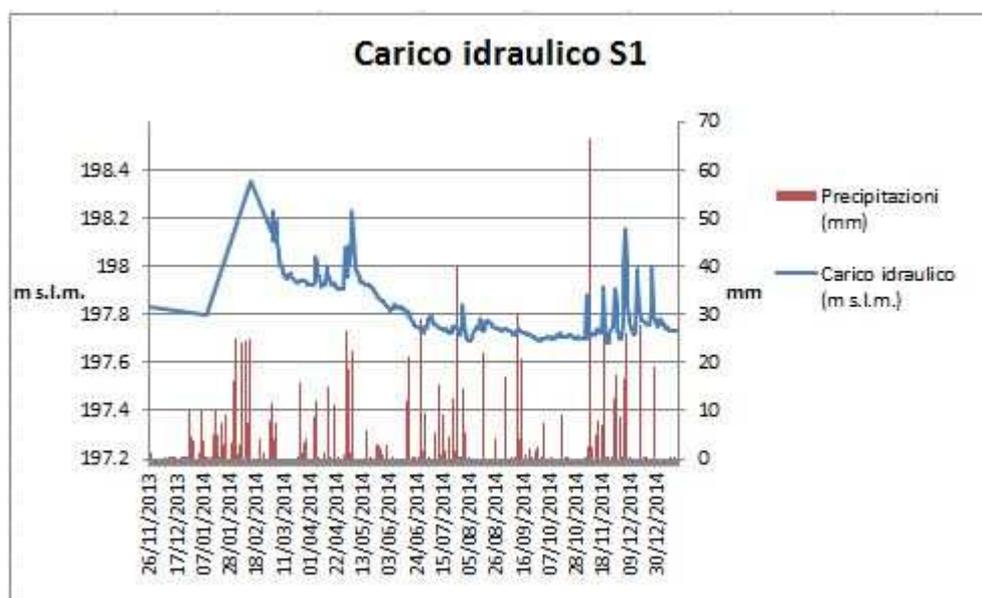


Fig.15.15 Grafico relativo al carico idraulico del piezometro S1. Il monitoraggio in continuo è partito il 01/03/2014.

Il carico idraulico nel piezometro S1 rispecchia l'andamento stagionale e le precipitazioni con il periodo estivo dove la falda si ritira maggiormente e il periodo autunnale-invernale in cui si rialza. Il livello di falda più basso di 197.69 m s.l.m. è stato misurato ad Agosto mentre il livello di falda più alto di 198.35 m s.l.m. si misura a fine Gennaio. L'escursione massima è di 0.66 m.

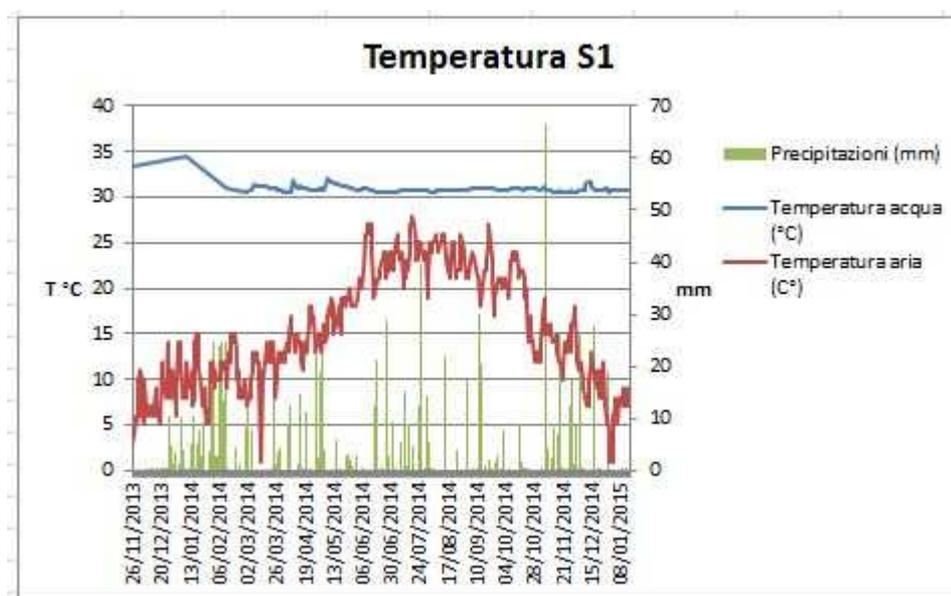


Fig.15.16- Grafico relativo alla temperatura dell'acqua del piezometro S1. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

[Digitare il testo]

La temperatura dell'acqua rappresentata nel grafico della Fig.15.16 rispecchia quella della sorgente "Le Caldanelle di Petriolo", infatti il piezometro S1 si trova a circa 10 m dal bottino di presa (Fig.11.5). Si può quindi affermare che provenga dallo stesso sistema di flusso d'alimentazione. La temperatura media è di 30.9 °C.

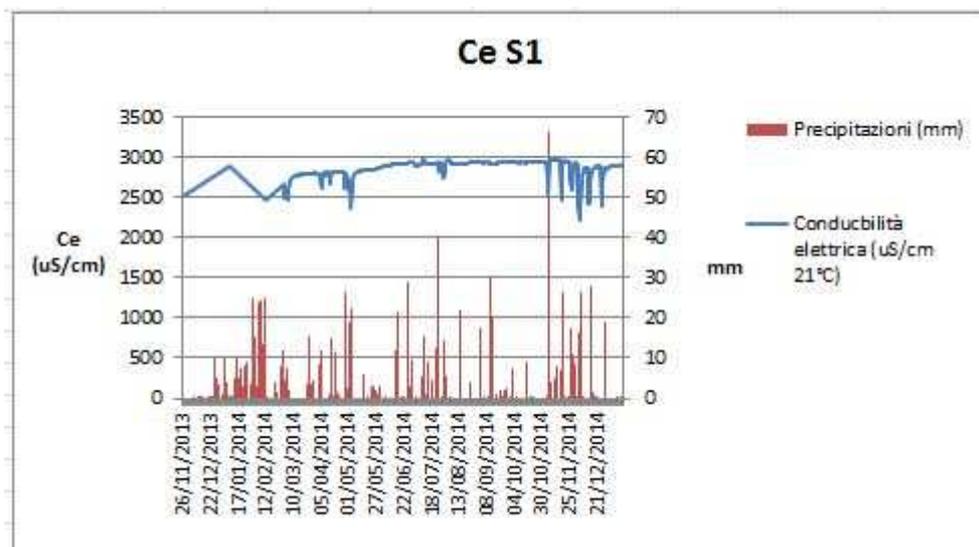


Fig.15.17- Grafico relativo alla conducibilità elettrica compensata a 21°C del piezometro S1. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

Per quanto riguarda la conducibilità elettrica relativa al piezometro S1 si può affermare che nei periodi autunnale-invernale subisce l'influenza delle precipitazioni le quali provocano dei picchi d'abbassamento del valore. Il valore medio è di 2855 uS/cm compensata a 21°C.

[Digitare il testo]

Piezometro S2



Fig.15.18- Grafico relativo al carico idraulico del piezometro S2. Il monitoraggio in continuo è partito il 01/03/2014.

Il carico idraulico nel piezometro S2 sembra rispecchiare meno l'andamento stagionale. Osservando il grafico in Fig.15.18 infatti si può vedere come la falda nei mesi di Giugno-Luglio invece di ritirarsi, comportamento che ci si aspetterebbe, ha una netta ripresa che comunque non è associabile a un particolare evento piovoso. Questa escursione della falda potrebbe essere dovuto alla posizione limitrofa all'alveo del "Fosso delle Caldanelle" che ne potrebbe influenzare il livello. Il livello di falda minore è di 198.76 m s.l.m. e si registra a Luglio mentre quello maggiore di 199.89 m s.l.m. lo abbiamo nel mese di Dicembre. L'escursione massima è quindi di 1.13 m.

[Digitare il testo]

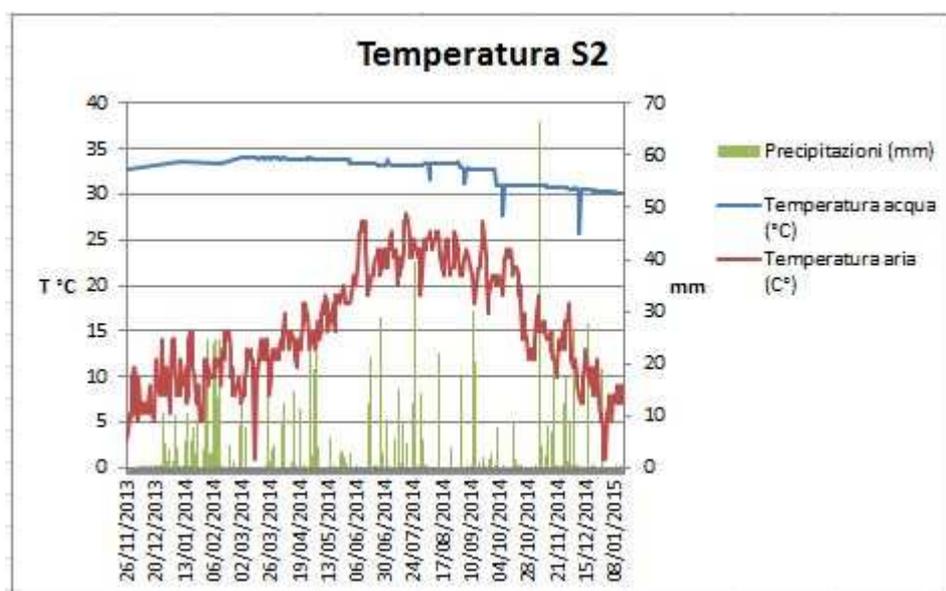


Fig.15.19- Grafico relativo alla temperatura dell'acqua del piezometro S2. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

La temperatura dell'acqua che viene raccolta nel piezometro S2 rispecchia i valori della sorgente "Le Caldanelle di Petriolo", infatti il piezometro S2 si trova a circa 5 m dal bottino di presa (Fig.11.5). Si può quindi affermare che provenga dallo stesso sistema di flusso d'alimentazione. Da notare una diminuzione della temperatura nel periodo autunnale-invernale, dimostrando quindi l'influenza della ricarica sul parametro. La temperatura media è di 32.7°C.

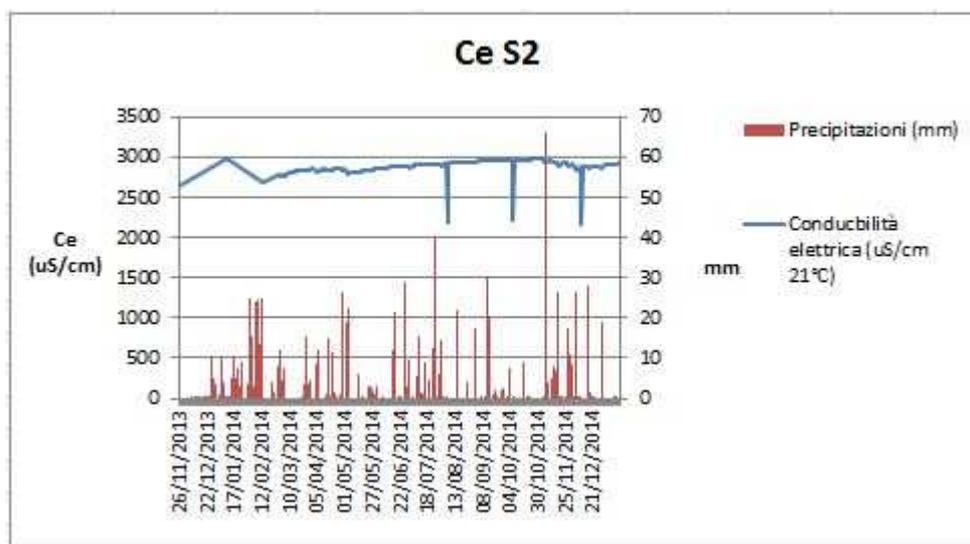


Fig.15.20- Grafico relativo alla conducibilità elettrica compensata a 21°C del piezometro S2. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

[Digitare il testo]

La conducibilità elettrica nel piezometro S2 è abbastanza stabile escludendo 3 netti eventi di abbassamento relativo dovuti probabilmente al mescolamento con acque piovane o provenienti dal “Fosso delle Caldanelle”. Il valore medio è di 2890 uS/cm compensata a 21°C.

Piezometro S3

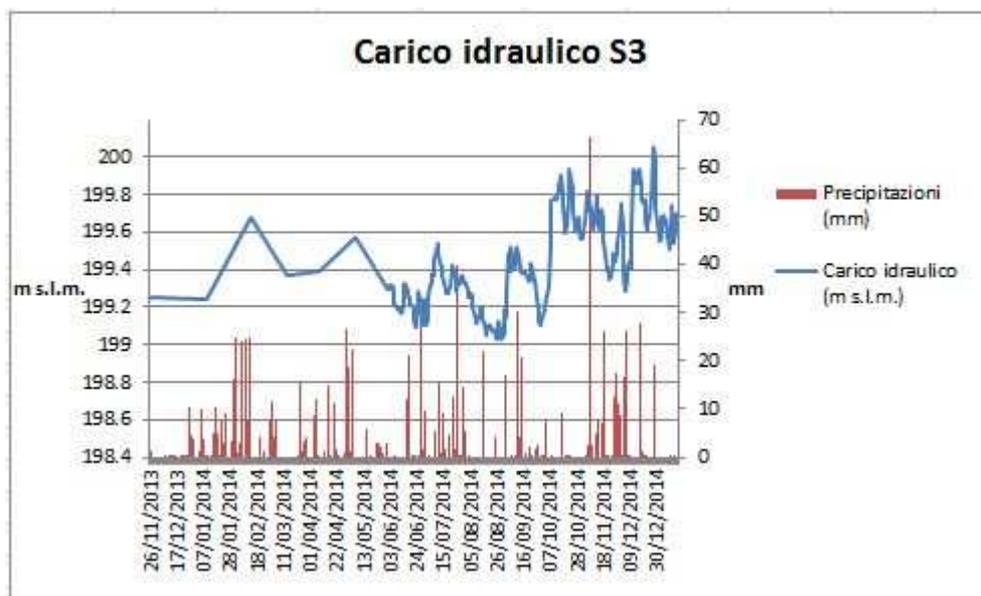


Fig.15.21- Grafico relativo al carico idraulico del piezometro S3. Il monitoraggio in continuo è partito il 01/06/2014.

Per il carico idraulico nel piezometro S3 vale il discorso fatto per il piezometro S2 infatti si trovano a una distanza di circa 4 m. Il livello di falda minore è di 199.03 m s.l.m. e si registra a Luglio mentre quello maggiore di 200.05 m s.l.m. lo abbiamo nel mese di Dicembre. L'escursione massima è quindi di 1.02 m.

[Digitare il testo]

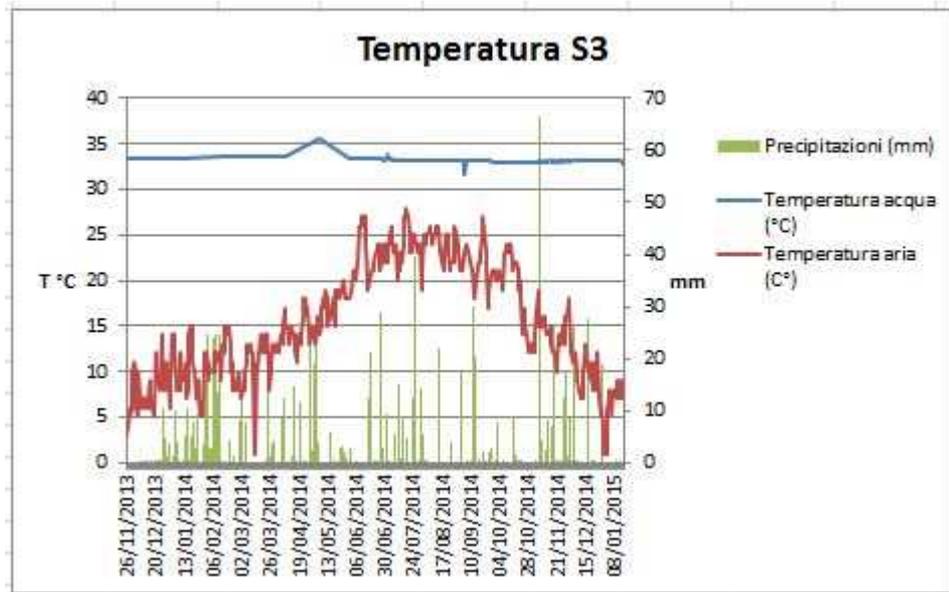


Fig.15.22- Grafico relativo alla temperatura dell'acqua del piezometro S3. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/06/2014.

La temperatura dell'acqua captata dal piezometro S3 rispecchia quella della sorgente "Le Caldanelle di Petriolo", infatti esso si trova a circa 5 m dal bottino di presa (Fig.11.5). Nell'andamento generale risalta un picco nella temperatura di 35.6°C registrato a Maggio e un basso di 31.5 °C registrato a Settembre rispetto la temperatura media di 33.2°C, altrimenti molto stabile.

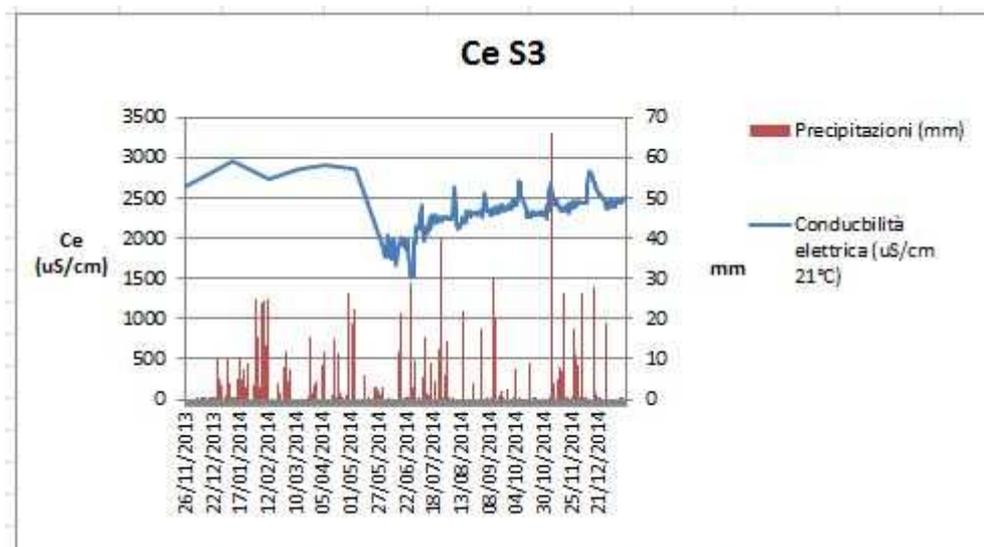


Fig.15.23- Grafico relativo alla conducibilità elettrica compensata a 21°C del piezometro S3. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/06/2014.

[Digitare il testo]

La conducibilità elettrica del piezometro S3 subisce un netto calo, da 2860 uS/cm a 1763 uS/cm nel periodo tra metà e fine Maggio, mentre nel resto del grafico di Fig.15.23 ha un andamento abbastanza lineare costante con degli incrementi legati alla ricarica. Il valore medio è di 2305 uS/cm compensata a 21°C.

Piezometro S4

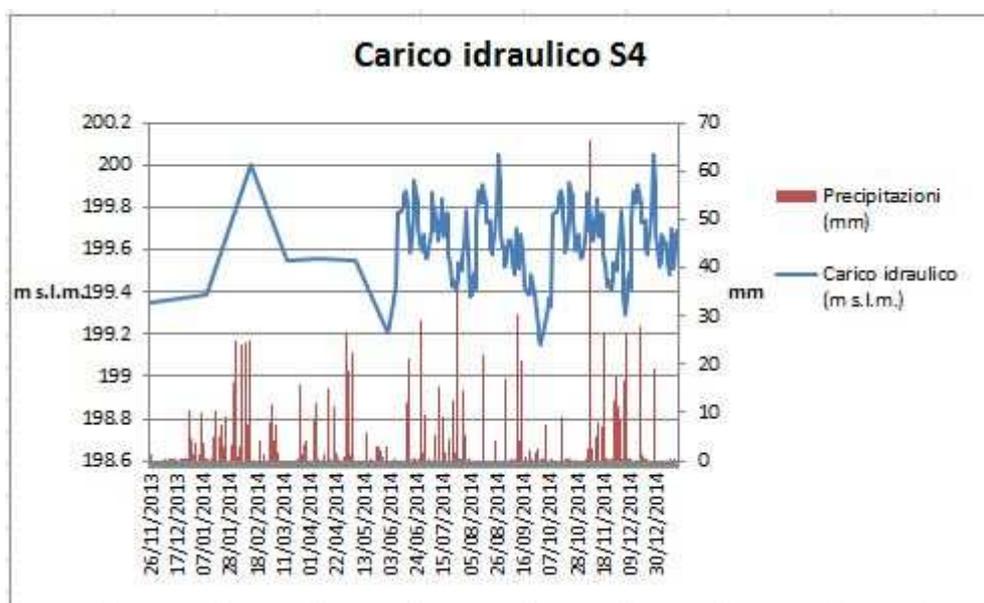


Fig.15.24- Grafico relativo al carico idraulico del piezometro S4. Il monitoraggio in continuo è partito il 01/06/2014.

Il carico idraulico nel piezometro S4 sembra non rispecchiare l'andamento stagionale, infatti registra innalzamenti di falda importanti anche nella stagione estiva. Probabilmente come S2 e S3 (si trova a pochi m di distanza), subisce l'influenza delle acque del "Fosso delle Caldanelle" trovandosi presso l'alveo di quest'ultimo. La misura maggiore di livello piezometrico, registrata in due occasioni, ad Agosto ed a Dicembre, è di 200.04 m s.l.m., mentre la minore, registrata a Ottobre, è di 199.16 m s.l.m., con un escursione massima di 0.88 m.

[Digitare il testo]

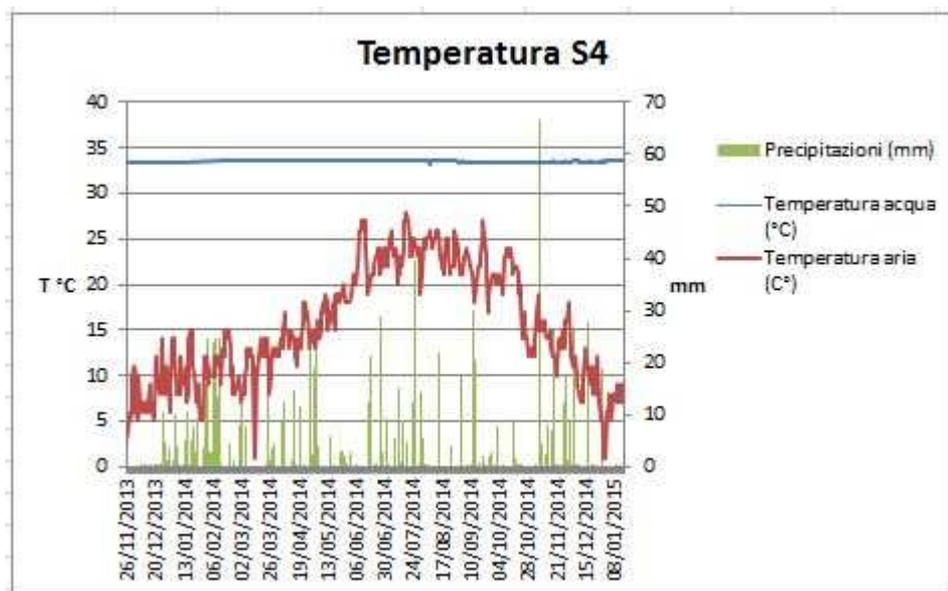


Fig.15.25- Grafico relativo alla temperatura dell'acqua del piezometro S4. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/06/2014.

La temperatura dell'acqua, rappresentata nel grafico della Fig.15.25, rispecchia i valori della sorgente "Le Caldanelle di Petriolo", infatti il piezometro S4 si trova anch'esso a circa 5 m dal bottino di presa (Fig.11.5). L'andamento generale è abbastanza uniforme, risalta un valore negativo di 31.1 °C registrato a Settembre, che è osservabile anche nel piezometro S3 (Fig.15.22). La temperatura media è di 33.5°C.

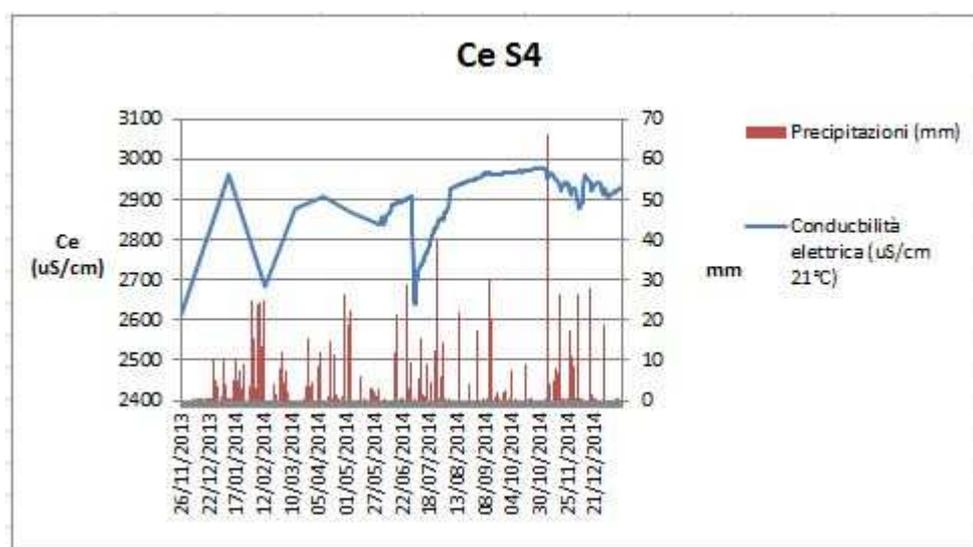


Fig.15.26- Grafico relativo alla conducibilità elettrica compensata a 21°C del piezometro S4. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/05/2014.

[Digitare il testo]

La conducibilità elettrica relativa al piezometro S4 nella prima metà del grafico (periodo Novembre 2013-Agosto 2014) ha un comportamento molto variabile per poi diventare costante da Agosto in poi. Il valore medio è di 2914 uS/cm.

Piezometro S5



Fig.15.27- Grafico relativo al carico idraulico del piezometro S1. Il monitoraggio in continuo è partito il 01/03/2014.

Il carico idraulico nel piezometro S5 non rispecchia l'andamento stagionale, il carico idraulico cresce nel periodo in cui normalmente si ha il ritiro (ossia tra Maggio e Ottobre) per poi calare nel periodo autunnale. La misura maggiore di livello, registrata a Febbraio, è di 198.21 m s.l.m., la minore, registrata a Dicembre, è di 197.29 m s.l.m., con una conseguente escursione massima di 0.92 m.

[Digitare il testo]

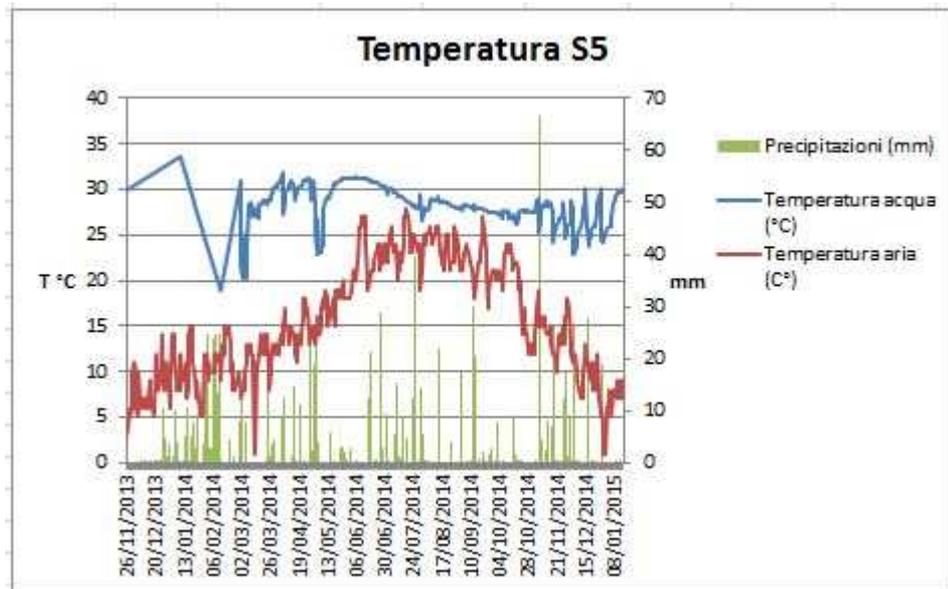


Fig.15.28- Grafico relativo alla temperatura dell'acqua del piezometro S5. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

Nel grafico di Fig.15.28 si può notare che l'acqua captata dal piezometro S5 è meno influenzata dalla sorgente "Le Caldanelle di Petriolo", da cui effettivamente la lontananza è maggiore rispetto ai piezometri precedentemente analizzati. Infatti la temperatura è tendenzialmente più bassa con i valori minori, 18°C-20°C, registrati nella stagione invernale a evidenziare l'influenza dei fattori atmosferici. La temperatura media è di 28.3 °C.

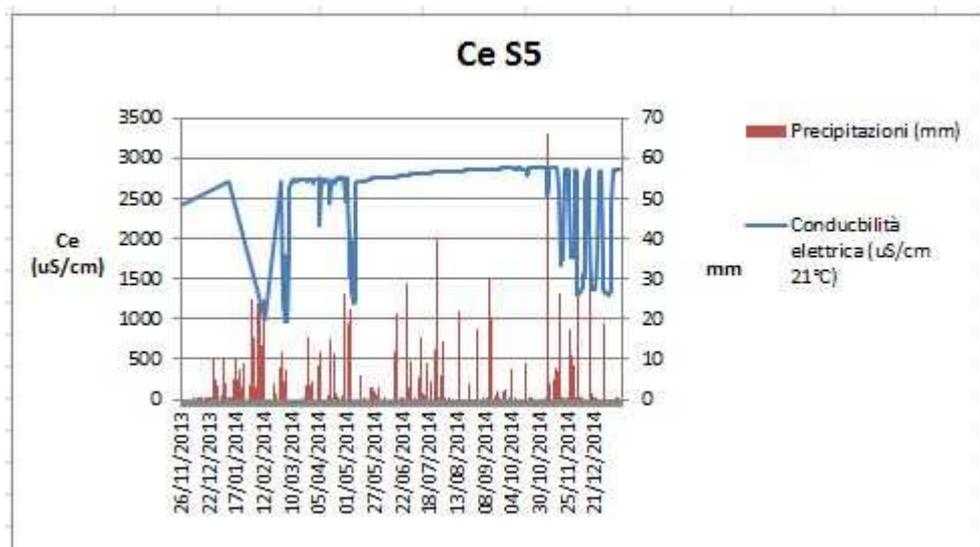


Fig.15.29- Grafico relativo alla conducibilità elettrica compensata a 21°C del piezometro S5. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

[Digitare il testo]

La conducibilità elettrica del piezometro S5 risulta costante nel periodo estivo mentre sia nel periodo primaverile che in quello autunnale-invernale subisce molti sbalzi in un intervallo di valore che va dai 1000 uS/cm ai 2700 uS/cm.. Il valore medio è di 2621 uS/cm.

Piezometro AP-1

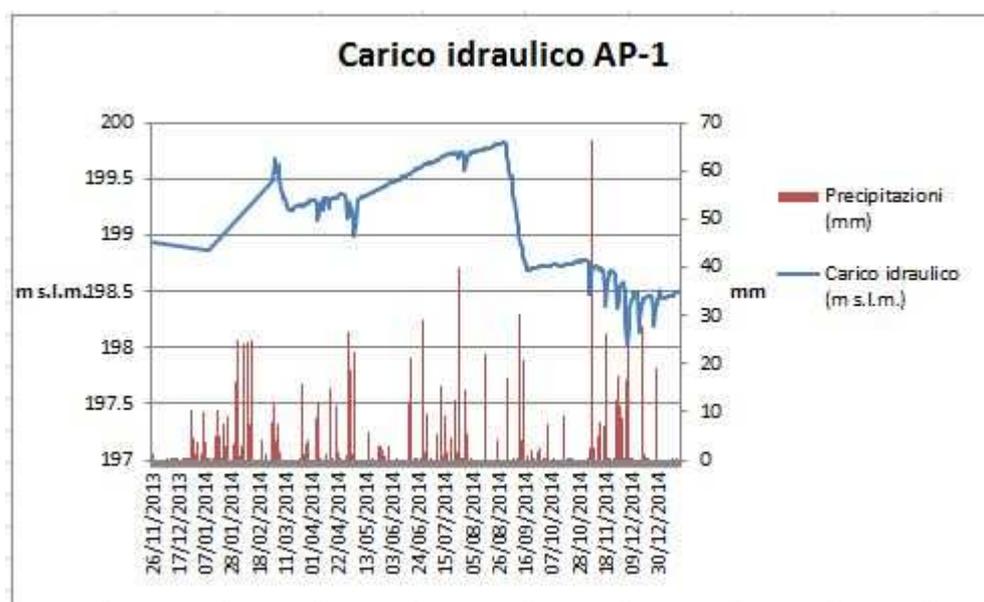


Fig.15.30-Grafico relativo al carico idraulico del piezometro AP-1. Il monitoraggio in continuo è partito il 01/03/2014.

Nel grafico in Fig.15.30 si può vedere l'andamento del carico idraulico nel piezometro AP-1 la quale attraversa due periodi di ricarica, uno da Gennaio a Febbraio e uno da Marzo ad Agosto per poi calare vistosamente. Il livello massimo di falda raggiunto è di 199.81 m s.l.m. a Settembre mentre il minimo è di 198.03 a Dicembre, con un escursione di 1.78 m. Si può affermare che il comportamento della falda sembra non seguire l'andamento stagionale di ricarica.

[Digitare il testo]

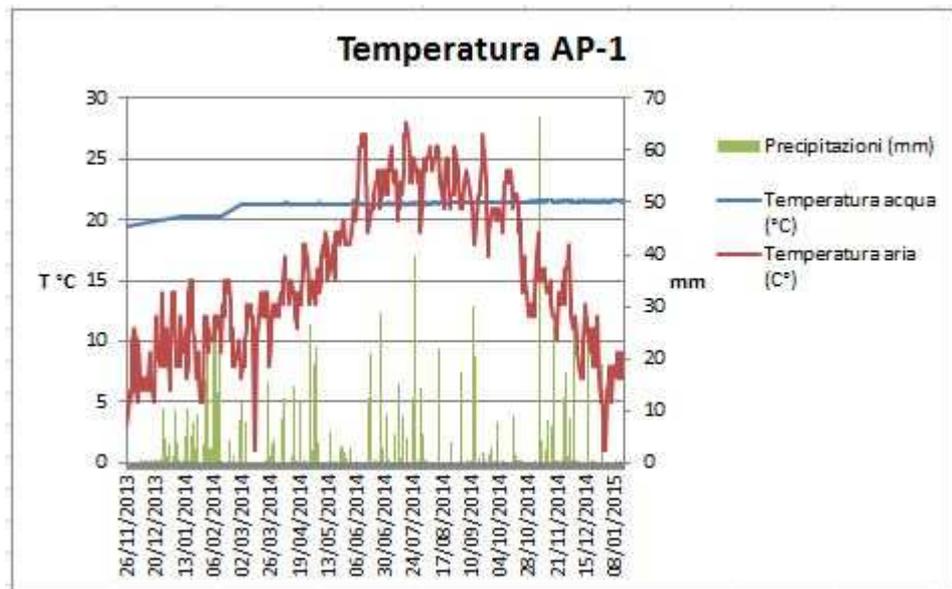


Fig.15.31- Grafico relativo alla temperatura dell'acqua del piezometro AP-1. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

Dal grafico in Fig.15.31 si può osservare che l'acqua captata dal piezometro AP-1 è "fredda" ($< 20^{\circ}\text{C}$), nel periodo da Novembre 2013 a Febbraio 2014, salvo poi stabilizzarsi su una temperatura di circa 21°C , ossia "ipotermale", che mantiene anche nel successivo periodo invernale probabilmente per le temperature più calde rispetto gli anni precedenti che si sono registrate nell'ultimo inverno. La temperatura media è di 21.2°C .

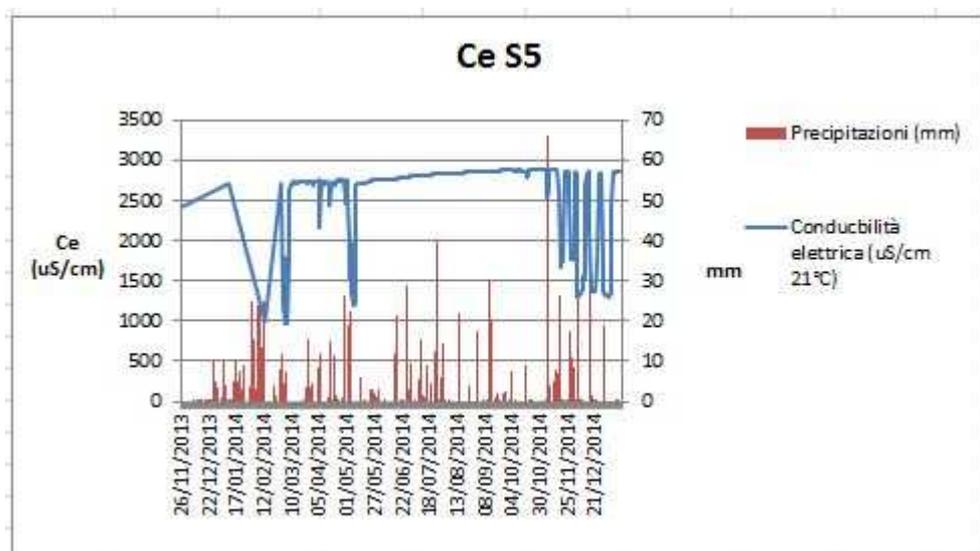


Fig.15.32- Grafico relativo alla conducibilità elettrica compensata a 21°C del piezometro AP-1. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

[Digitare il testo]

La conducibilità elettrica relativa al piezometro AP1 è abbastanza stabile mantenendosi in un intervallo 2000-3000 uS/cm a 21°C. Il suo valore medio è di 2750 uS/cm a 21°C.

Piezometro CP-2

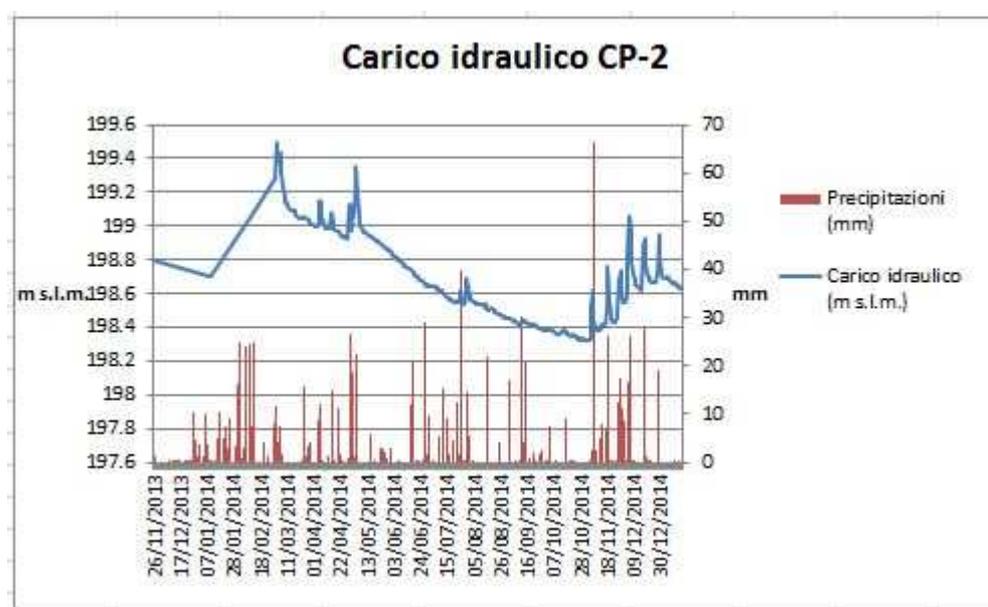


Fig.15.33- Grafico relativo al carico idraulico del piezometro CP-2. Il monitoraggio in continuo è partito il 01/03/2014.

Dal grafico in Fig.15.33 si può vedere che il carico idraulico del piezometro CP-2 è caratterizzato da 2 periodi di ricarica: il primo a Gennaio-Marzo e il secondo a Novembre-Dicembre. Da Maggio a inizio Novembre invece la falda tende a ritirarsi, quindi si può affermare che essa segue un andamento stagionale tipico dell'area degli Appennini. Il livello massimo registrato è di 199.49 m s.l.m. e quello minimo di 198.32, rispettivamente a Marzo e Novembre. L'escursione della falda è quindi di 1.17 m.

[Digitare il testo]

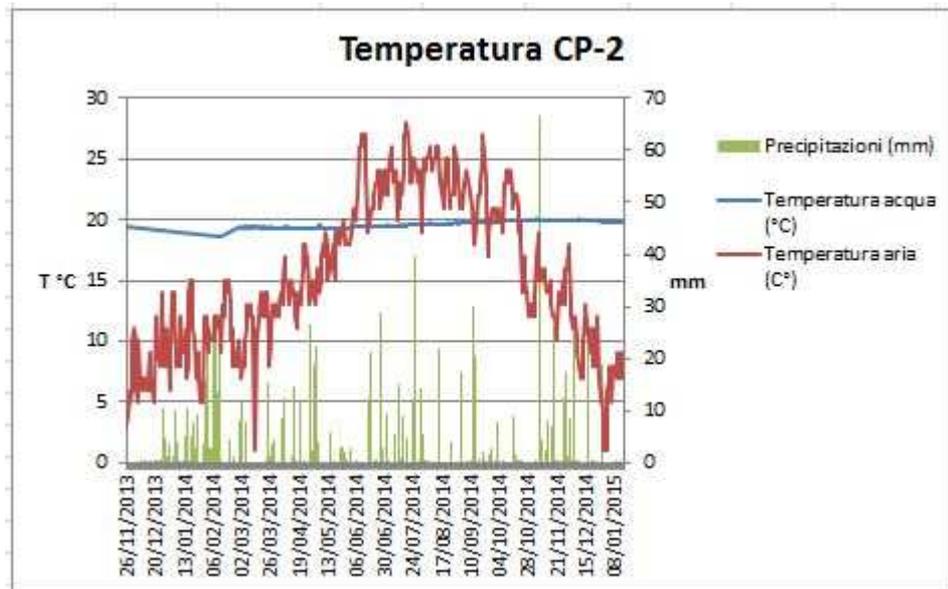


Fig.15.34- Grafico relativo alla temperatura dell'acqua del piezometro CP-2. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

Dal grafico in Fig.15.34 si può osservare che l'acqua captata dal piezometro CP2 è "fredda" ($< 20^{\circ}\text{C}$), variando nell'intervallo di valore di $18.5\text{-}20^{\circ}\text{C}$. Essa comunque, alla fine della stagione invernale, raggiunge le temperature maggiori in quanto collocata nella zona che risente, con ritardo, delle oscillazioni stagionali di temperatura (zona eteroterma annuale). La temperatura media è di 19.62°C .

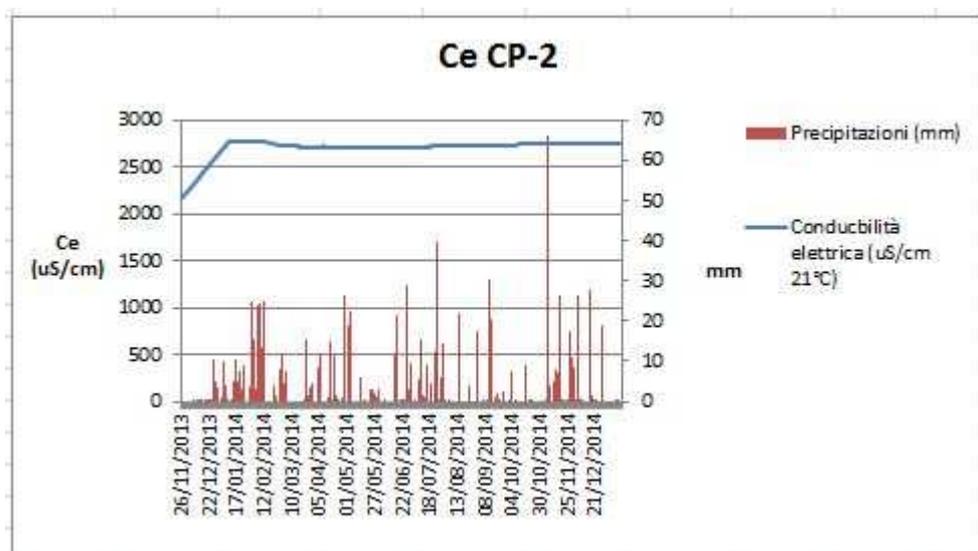


Fig.15.35- Grafico relativo alla conducibilità elettrica compensata a 21°C del piezometro CP-2. Il monitoraggio in continuo è cominciato il 01/03/2014.

[Digitare il testo]

La conducibilità elettrica relativa al piezometro CP-2 è abbastanza stabile mantenendosi nell'intervallo 2,000-3,000 uS/cm. Il suo valore medio è di 2,729 uS/cm.

15.4 Sintesi e confronti

In questo paragrafo verranno illustrati dei grafici di sintesi relativi al periodo di monitoraggio in continuo riguardanti i piezometri in riferimenti ai parametri di carico idraulico, temperatura e conducibilità elettrica. Successivamente verranno rappresentate delle mappe isovalore riguardanti l'area della sorgente "Le Caldanelle di Petriolo" e i 7 piezometri per i parametri di escursione piezometrica, temperatura e conducibilità elettrica.

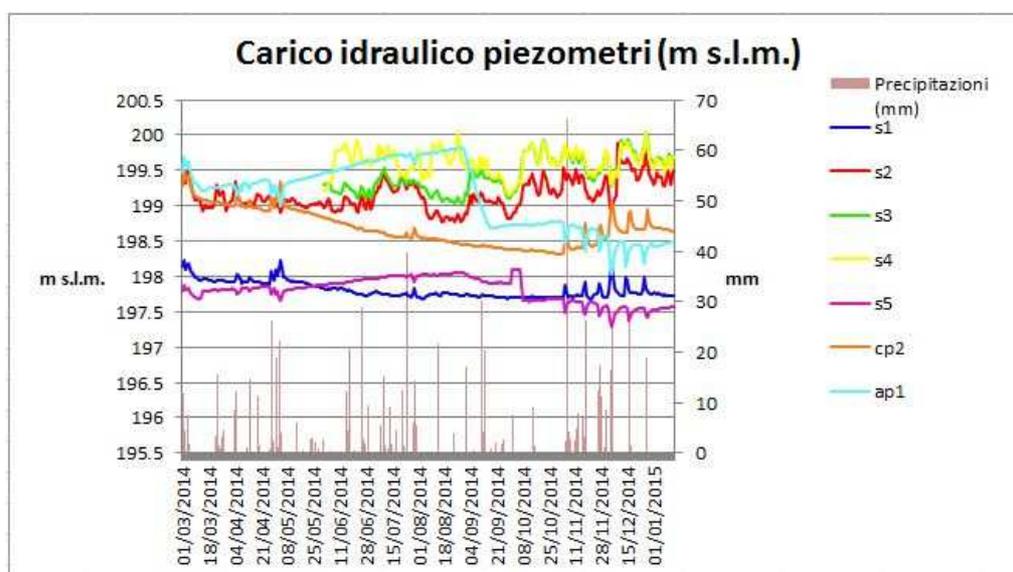


Fig.15.36- Grafico rappresentante l'andamento del carico idraulico nei 7 piezometri e le precipitazioni del periodo di monitoraggio continuo.

Dal grafico in Fig.15.36 si può notare come i piezometri dove è maggiore la risposta agli input delle precipitazioni siano S2, S3 e S4 che si trovano nell'alveo del "Fosso delle Caldanelle" dove si ha una concentrazione del flusso in occasione delle precipitazioni con aumenti improvvisi della portata che vanno ad influenzare il carico idraulico contiguo all'alveo.

S1 e S5 hanno un andamento abbastanza uniforme ed appaiono in antitesi fra loro in risposta alle precipitazioni con tempi di risposta differenti, in S1 più veloci e in S5 più lenti.

[Digitare il testo]

Questo comportamento dipende dalla geologia essendo presente una copertura detritica nei primi 8 m del piezometro S5, con scarse capacità di circolazione idrica, mentre in S1 fin dall'inizio c'è il Calcere Cavernoso.

CP-2 è l'unico che presenta un andamento aderente al regime climatico locale con un abbassamento del carico idraulico durante tutto il periodo primaverile-estivo seguito da una risalita con l'inizio del periodo di ricarica di fine Ottobre inizio Novembre.

Il piezometro AP-1 presenta un comportamento anomalo con una crescita del carico idraulico fino a metà Agosto seguita da una netta diminuzione tra fine Agosto e Settembre. In qualche modo comunque il piezometro è legato al regime climatico locale come CP-2.

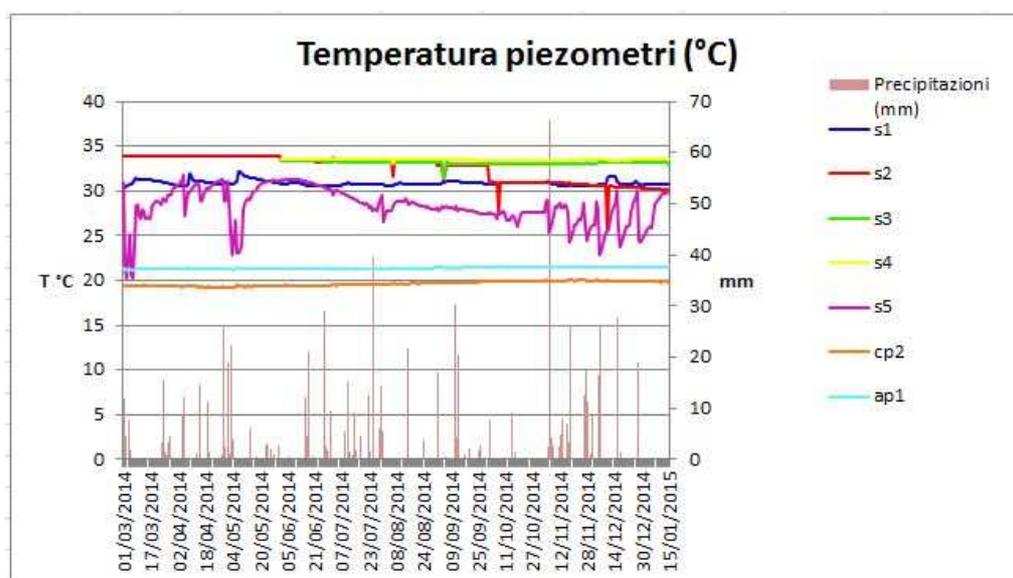


Fig.15.37- Grafico rappresentante l'andamento della temperatura nei 7 piezometri e le precipitazioni del periodo di monitoraggio in continuo.

Come si può vedere dal grafico in Fig.15.37 i piezometri posizionati vicino alla sorgente termale (S1, S2, S3, S4; vedi Fig. 11.6 per ubicazione) sono quelli caratterizzati da temperatura maggiore, compresa tra i 30°C e i 35 °C (condizioni classificabili come "ipotermali"). La temperatura di questi piezometri non risente del clima stagionale e delle precipitazioni a esclusione per S2 che subisce un leggero raffreddamento da fine Settembre.

[Digitare il testo]

AP-1 e CP-2 hanno una temperatura costantemente intorno ai 20 °C, ossia “fredda”, mentre S5 rileva frequenti sbalzi di temperatura, probabilmente dovuti alla sua posizione “intermedia” nei confronti della sorgente termale la quale ne influenza solo parzialmente i valori di temperatura; di contro nel caso di intense precipitazioni subisce raffreddamento da quest’ultime.

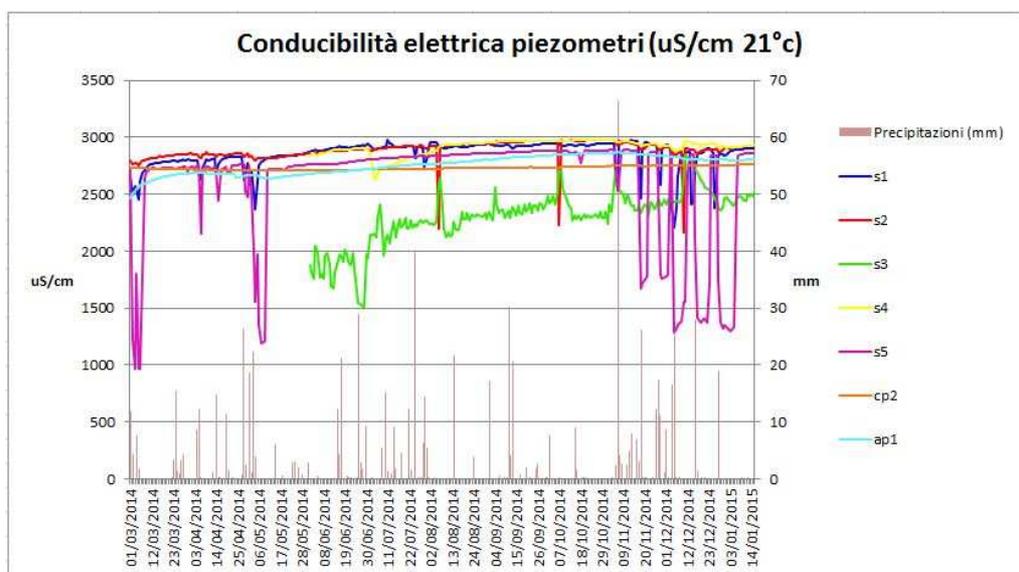


Fig.15.38- Grafico rappresentante l’andamento della conducibilità elettrica compensata a 21°C nei 7 piezometri e le precipitazioni del periodo di monitoraggio in continuo.

Dal grafico in Fig.15.38 risalta l’andamento fortemente irregolare del valore della conducibilità relativa al piezometro S5 e il valore relativamente più basso registrato nel piezometro S3. In generale il valore tende a mantenersi nell’intervallo 2500-3000 uS/cm di conducibilità elettrica compensata a 21°C, quindi denotando una elevata salinità delle acque.

[Digitare il testo]

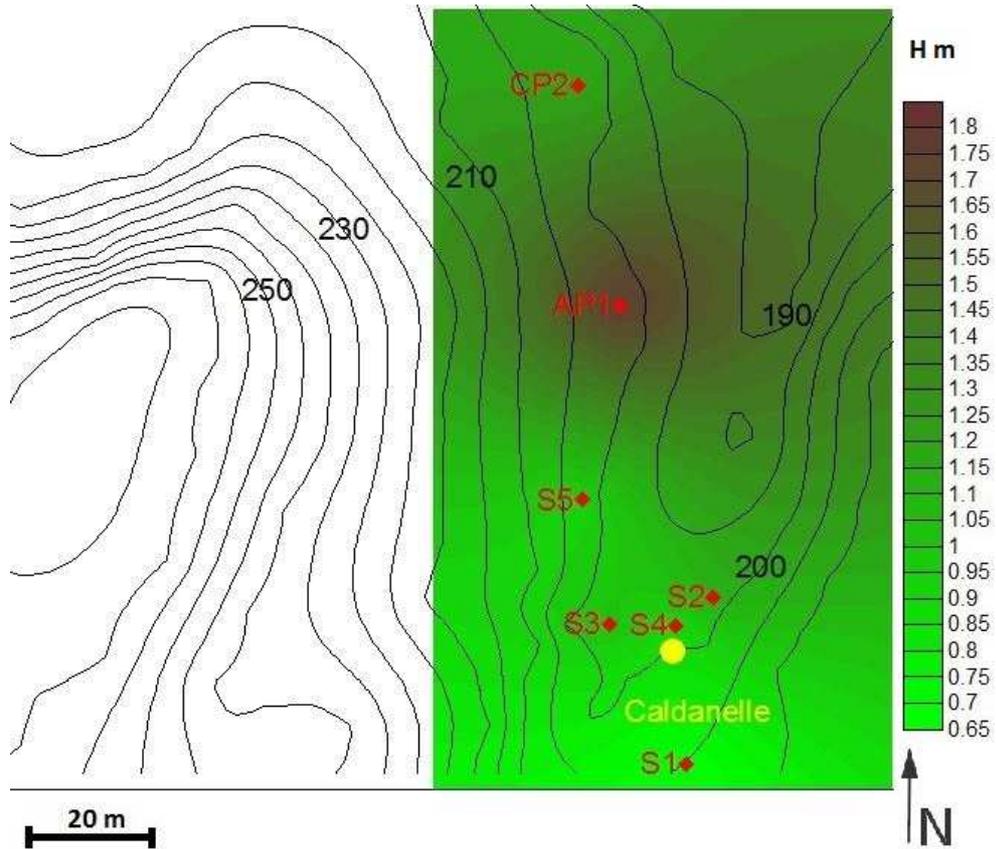


Fig.15.39- Mappa relativa ai dati di escursione piezometrica dei 7 piezometri.

Come si può vedere dall'immagine in Fig.15.39 l'escursione piezometrica è maggiore nei piezometri AP-1 e CP-2 e questo fatto può essere ricondotto alla geologia del luogo essendo i piezometri AP-1 e CP-2 impostati nella formazione dei "Galestri e Palombini" che funge da acquitardo per le sue scarse capacità di circolazione idrica e permeabilità e che, quindi, non avendo capacità di serbatoio naturale, risente maggiormente del periodo di magra a differenza dei restanti piezometri che si trovano nella formazione del Calcere Cavernoso il quale costituisce l'acquifero principale. I due piezometri, inoltre, risentono meno del termalismo che tende a mantenere elevato e costante il livello piezometrico.

[Digitare il testo]

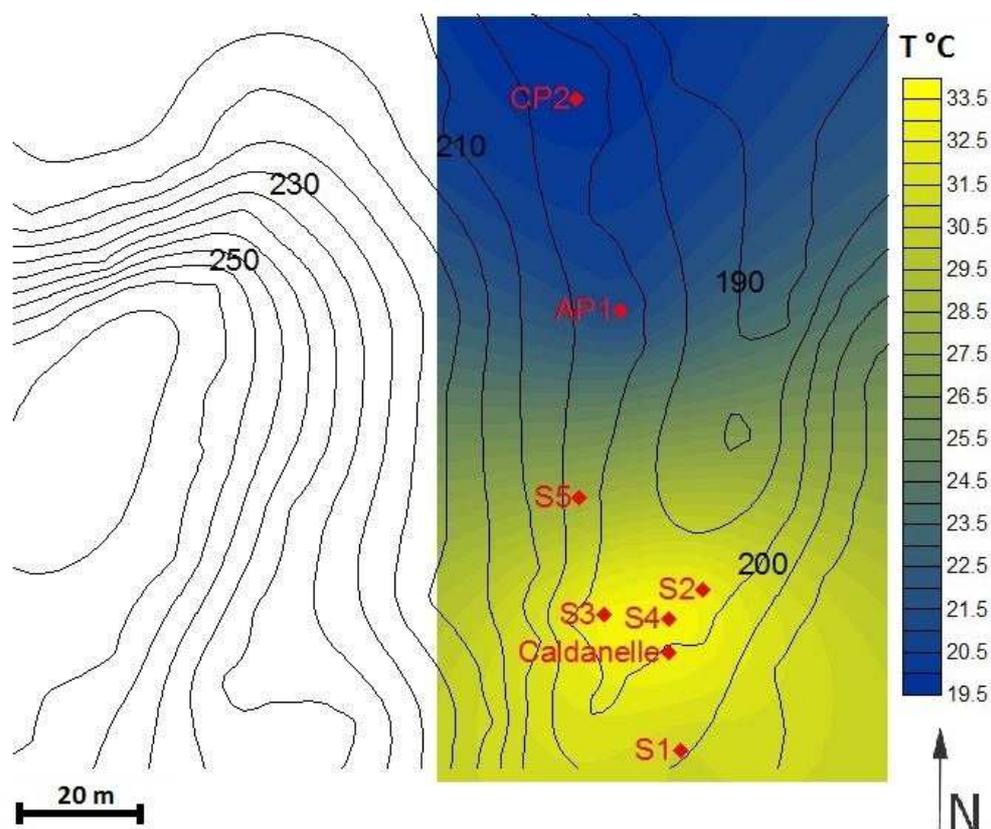


Fig.15.40- Mappa relativa ai dati di temperatura dei 7 piezometri e della sorgente “Le Caldanelle di Petriolo”.

Per quanto riguarda la temperatura delle acque si nota chiaramente la connessione tra i valori e la distanza dalla sorgente termale “*Le Caldanelle di Petriolo*”, la quale riceve l’afflusso dei fluidi idrotermali dalla faglia diretta denominata “Faglia delle Caldanelle” che mette a contatto il Calcare Cavernoso con i Galestri e Palombini. Questa faglia si sviluppa lungo la valle del Fosso delle Caldanelle, quindi più probabilmente l’afflusso di calore potrebbe riguardare più che unicamente la sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*” l’intero tratto di alveo interessato dalla faglia. Le acque relative alla sorgente e ai piezometri S1, S2, S3, S4 e S5 vengono classificate come ipotermali (temperatura tra 20-35 °C). AP-1 e CP-2 invece sono classificate come acque fredde (temperatura <20 °C).

[Digitare il testo]

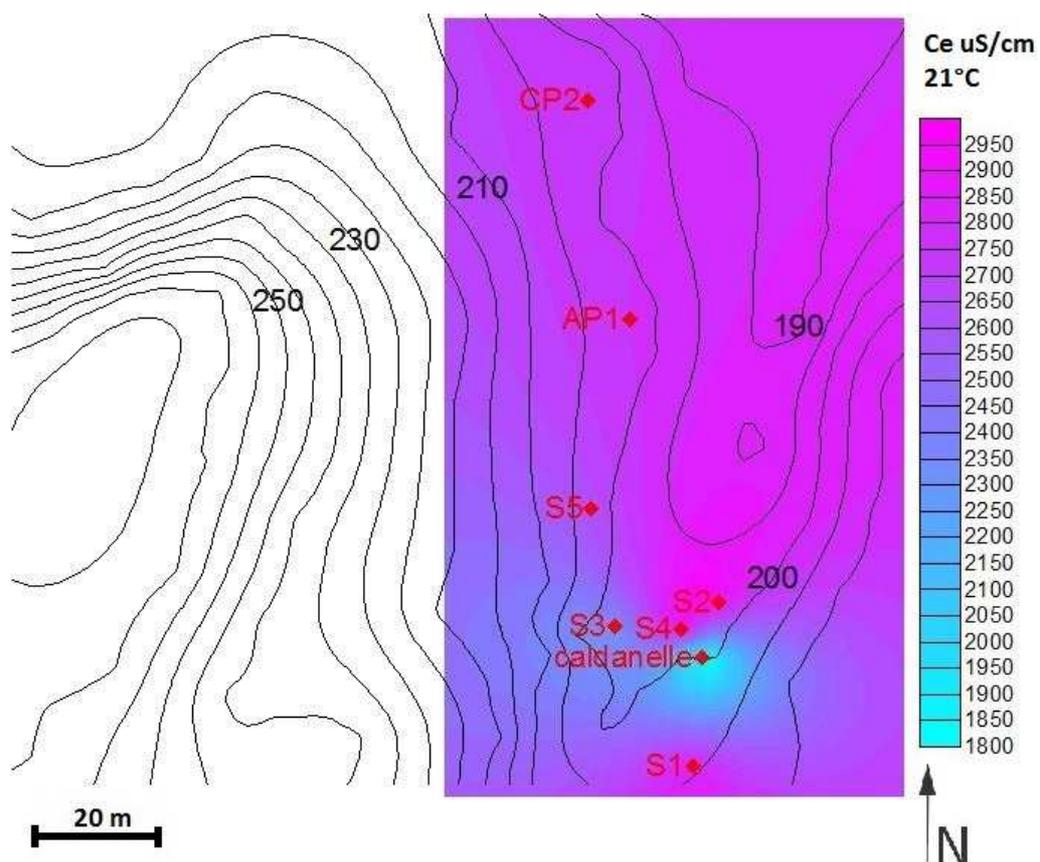


Fig.15.41- Mappa relativa ai dati della conducibilità elettrica compensata a 21 °C dei 7 piezometri e della sorgente “Le Caldanelle di Petriolo”.

In Fig.15.41 si vede la mappa relativa alla conducibilità elettrica compensata a 21°C, i valori relativamente più bassi si riscontrano presso la sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*”. Probabilmente il valore maggiore di conducibilità elettrica allontanandosi dalla sorgente dipende dalla formazione di provenienza dell’acqua, ossia in questo caso per i piezometri AP-1 e CP-2 i Galestri e Palombini. La circolazione più attiva nel Calcare Cavernoso favorisce una minore mineralizzazione.

[Digitare il testo]

Capitolo 16 - Classificazione delle sorgenti in base ai loro sistemi di flusso alimentanti

In questo paragrafo verrà illustrata l'analisi della curva d'esaurimento delle sorgenti prese in esame. Le sorgenti a cui è stato possibile applicare la classificazione sono "Le Caldanelle di Petriolo", "Porcareccia", "AST 05" e "AST 06" per i motivi precedentemente spiegati. I dati utilizzati fanno riferimento al monitoraggio in corso d'opera nel periodo d'esaurimento della sorgente in questione.

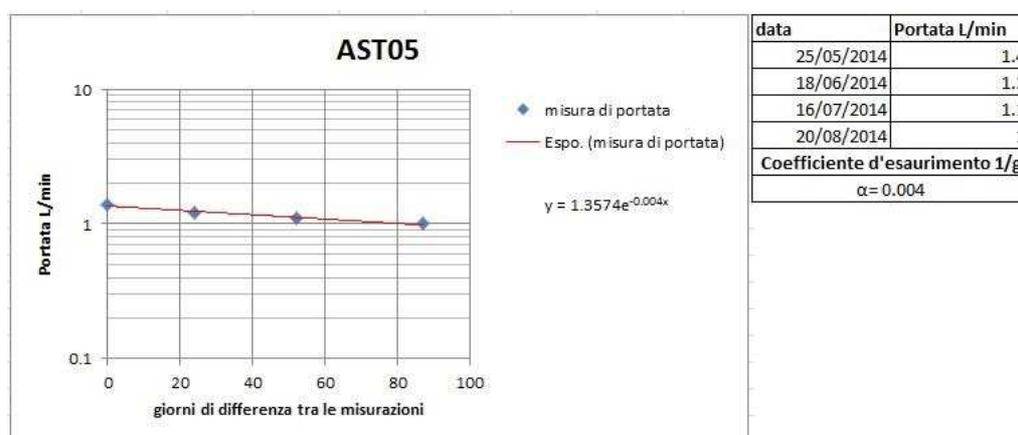


Fig.16.1- Curva d'esaurimento della sorgente AST 05, di equazione " $y=1.3574e^{-0.004x}$ ".

Il valore del coefficiente d'esaurimento della sorgente AST 05 è di 0.004 1/g. Per vedere il monitoraggio completo e le precipitazioni consultare il capitolo precedente (Cap.15).

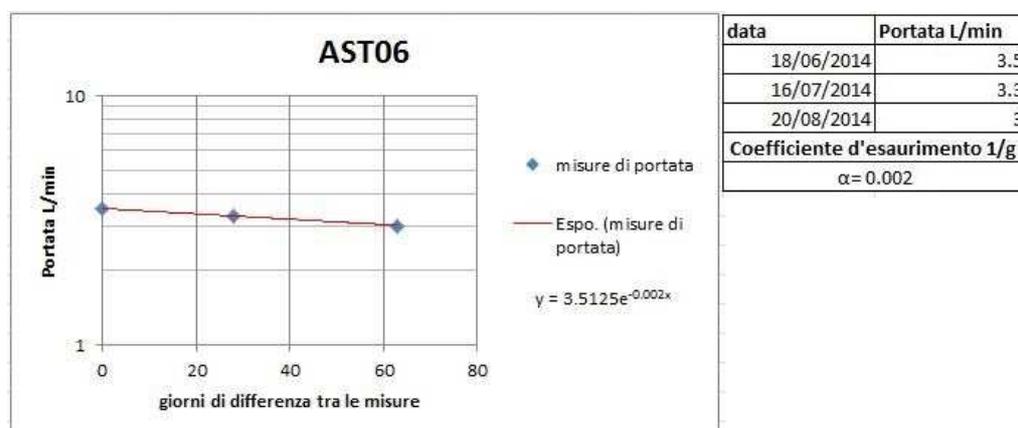


Fig.16.2- Curva d'esaurimento della sorgente AST 06, di equazione " $y=3.5125e^{-0.002x}$ ".

[Digitare il testo]

Il valore del coefficiente d'esaurimento della sorgente AST 06 è di 0.002 1/g. Per vedere il monitoraggio completo e le precipitazioni consultare il capitolo precedente (Cap.15).

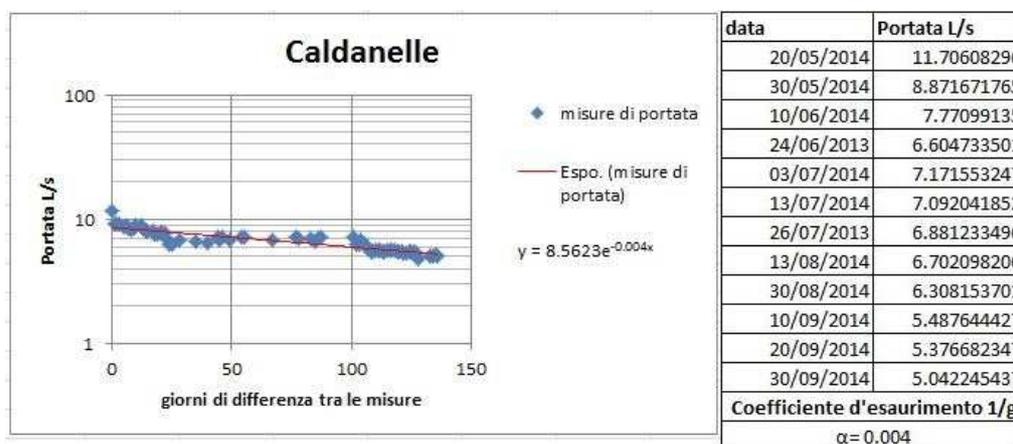


Fig.16.3- Curva d'esaurimento della sorgente Caldanelle, di equazione “ $y=8.5623e^{-0.004x}$ ”.

Il valore del coefficiente d'esaurimento della sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*” è di 0.004 1/g. I valori di portata esposti nella tabella in Fig.16.3 sono solo una parte dei valori presi in considerazione per il calcolo del coefficiente d'esaurimento della sorgente, essendo il monitoraggio svolto in continuo a frequenza oraria (24 misure al giorno) con quindi a disposizione una mole di dati scomoda da riportare in tabella. Le misure riportate hanno una cadenza circa di 10 giorni essendo stati esclusi i giorni con episodi di ricarica dovuti alle precipitazioni. Da sottolineare che l'equazione è calcolata sulle misure che si vedono in figura delle quali solo una parte è rappresentata in tabella.

Per vedere il monitoraggio completo e le precipitazioni consultare il capitolo precedente (Cap.15).

[Digitare il testo]

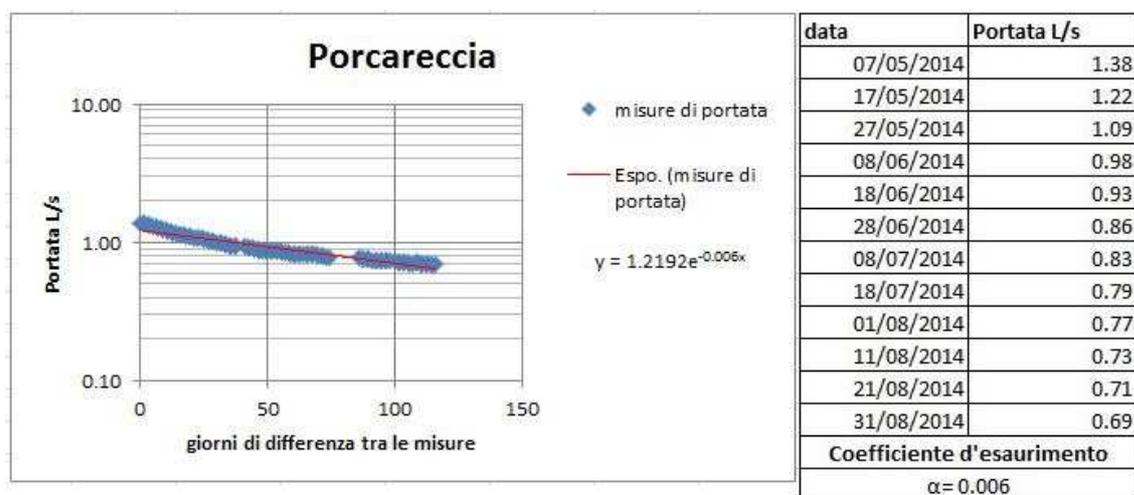


Fig.16.4- Curva d'esaurimento della sorgente Porcareccia, di equazione “ $y=1.2192e^{-0.006x}$ ”.

Il valore del coefficiente d'esaurimento della sorgente “*Porcareccia*” è di 0.006 1/g. I valori di portata esposti nella tabella in Fig.16.4 sono solo una parte dei valori presi in considerazione per il calcolo del coefficiente d'esaurimento della sorgente, essendo il monitoraggio svolto in continuo con frequenza di una misura ogni 5 minuti e con quindi a disposizione una mole di dati scomoda da riportare in tabella. Le misure riportate hanno una cadenza circa di 10 giorni essendo stati esclusi i giorni con episodi di ricarica dovuti alle precipitazioni. Da sottolineare che l'equazione è calcolata sulle misure che si vedono in figura delle quali solo una parte è rappresentata in tabella.

Per vedere il monitoraggio completo e le precipitazioni consultare il capitolo precedente (Cap.15).

Nel grafico di Fig.16.5 si può vedere in quale campo vanno a posizionarsi le precedenti sorgenti, secondo l'approccio di Gargini et al. (2008). In ordinata è riportata la differenza fra il punto d'emergenza della sorgente e il livello idrologico di base locale e in ascissa il parametro *Base yield* (By), considerato un indice empirico della produttività della sorgente nel periodo di magra.

[Digitare il testo]

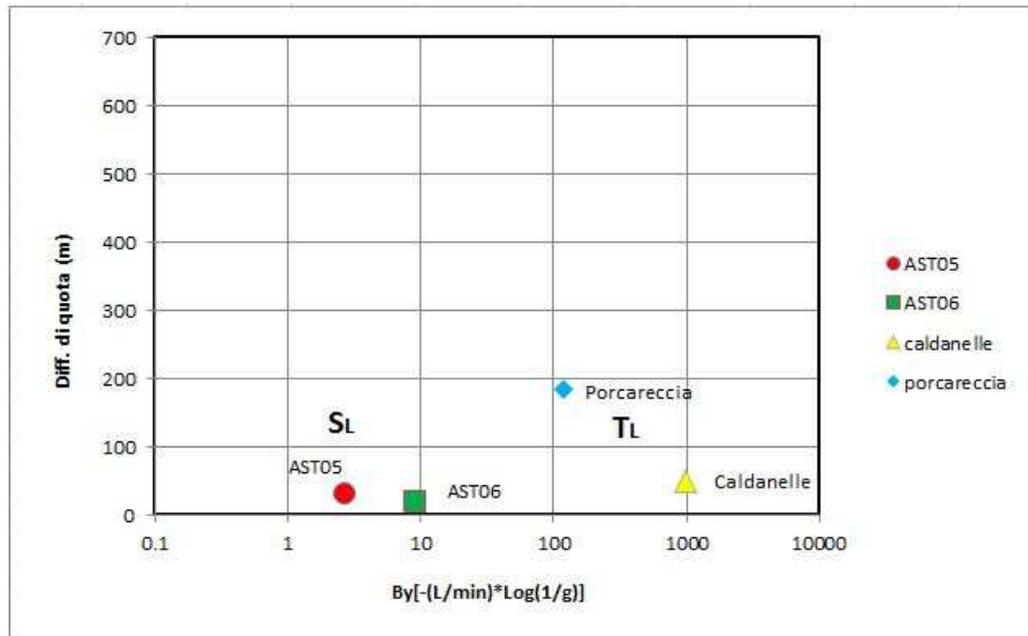


Fig.16.5- Grafico di distribuzione delle sorgenti i base al sistema di flusso che le alimenta. Le sigle SL e TL indicano i campi in cui ricadono le sorgenti.

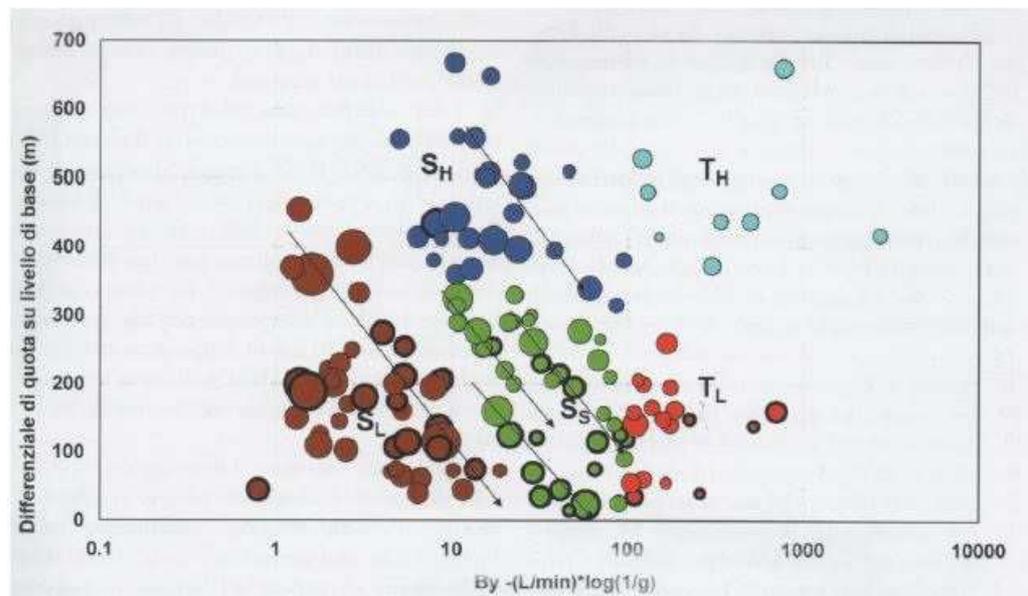


Fig.16.6 - Grafico di distribuzione delle sorgenti i base al sistema di flusso che le alimenta. Per la descrizione del grafico rifarsi al paragrafo 13.2.2

Confrontando il grafico in Fig.16.5 con il grafico in Fig.16.6 dove sono indicate le aree relative ai differenti sistemi di flusso d'alimentazione delle sorgenti si vede che le sorgenti AST 05 e AST 06 vanno a posizionarsi nel campo "SL", ossia dei "Sistemi locali di flusso di minor grado gerarchico di bassa quota", i quali solitamente sono associati a sistemi di flusso locale con una limitata espansione areale e portate ridotte.

[Digitare il testo]

La sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*” si posiziona nell’area “TL”, dei “Sistemi di flusso regionali di bassa quota”, caratterizzati da portate importanti e sistemi alimentati da strutture tettoniche regionali.

La sorgente “*Porcareccia*” si trova anch’essa nel campo dell’area “TL” ma al limite con il campo dell’area “S_s”, cioè i “Sistemi locali di flusso di versante” dove si posizionano sorgenti di piccola e media portata (max 1 L/s).

Capitolo 17 – Conclusioni

Alla luce dei dati raccolti, analizzati ed elaborati rispetto all'area interessata dalle attività di monitoraggio idrogeologico e dalla verifica di una potenziale interferenza idrogeologica dovuta alla costruzione della nuova canna occidentale della galleria "Casal di Pari" ed alla costruzione della galleria "Greppoli", siamo giunti alle seguenti conclusioni. Le conclusioni riguardano, in primo luogo, la definizione delle caratteristiche idrogeologiche delle unità studiate e la formulazione del modello concettuale della circolazione idrica sotterranea delle emergenze monitorate, in secondo luogo una formulazione del potenziale rischio d'impatto delle sorgenti a seguito dello scavo delle due gallerie di progetto.

Il contesto idrogeologico è caratterizzato dalla presenza di 2 unità che possono essere definite come acquiferi, anche se con differente grado e tipo di permeabilità e differenti condizioni idro-strutturali di affioramento: l'unità del Verrucano ed il Calcare Cavernoso.

L'unità metamorfica del Verrucano si contraddistingue come un tipico *hard rock aquifer* caratterizzato da una permeabilità medio-bassa per fratturazione e detensionamento/alterazione superficiale con una forte anisotropia della permeabilità medesima e sistemi di flusso superficiali, alimentati dalla ricarica, che recapitano prevalentemente nei corsi d'acqua che incidono maggiormente il substrato (Torrente Farma) o in piccole e numerose sorgenti di scarsa portata. La permeabilità e la profondità ed estensione dei sistemi di circolazione idrica sotterranea aumentano localmente solo in presenza di fasce fratturate e faglie: il deflusso di base del Torrente Farma, ad esempio, è dovuto prevalentemente al contributo di importanti linee di faglia sulle quali il corso è impostato e che possono essere considerate le vie preferenziali di deflusso sotterraneo dell'acqua.

[Digitare il testo]

Anche per quanto riguarda le sorgenti risulta evidente tale dualità di comportamento: vi è una netta differenza tra le sorgenti AST 2, AST 04, AST 05, AST 06, legate a una circolazione superficiale con valori di portata dell'ordine di pochi L/min (valore max 20 L/min AST 04), e le sorgenti AST 01, *Porcareccia*, AST 10 che, in quanto legate a strutture tettoniche importanti (di tipo distensivo), registrano valori di portata decisamente più importanti (AST 01 arriva a 60 L/min, *Porcareccia* registra un valore massimo di 111 L/min e AST 10 fino a 600 L/min). La sorgente AST 01 e la sorgente AST 10 vengono classificate come sorgenti per “soglia di permeabilità sovrainposta”. Questo perché nelle rispettive aree la porzione di Verrucano nella quale sono impostate le sorgenti si ritrova parzialmente sottoposta alla formazione dei Galestri e Palombini, a permeabilità minore, per l'azione esercitata da faglie inverse. La formazione dei Galestri e Palombini esercita così una funzione di sbarramento idraulico che porta alla crescita del livello piezometrico dell'acquifero fino al raggiungimento della soglia di permeabilità alla quota più bassa. La “*Porcareccia*” invece può essere classificata come sorgente per “limite di permeabilità indefinito” (Civita, 2005) trovandosi in un complesso litologicamente omogeneo, il Verrucano, ed essendo quindi associata a una zona a permeabilità maggiore rispetto l'intorno dovuta a una maggiore fatturazione o maggiore detensionamento/alterazione superficiale.

In taluni casi le strutture distensive danno alle emergenze un carattere termale, mettendo in comunicazione il circuito superficiale con gli effetti termici dei fenomeni intrusivi tipici della Toscana meridionale: questo è il caso della sorgente AST 10, captata e sfruttata dai “*Bagni di Petriolo*” per uso termale.

La formazione del Calcere Cavernoso è l'unità acquifera più importante dell'area, pur se limitata in affioramento rispetto al Verrucano. La permeabilità, per fratturazione e dissoluzione, può essere localmente molto alta. Le emergenze sorgentizie legate al Calcere Cavernoso sono rappresentate dalla sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*”. Questa sorgente viene classificata termale in base ai dati raccolti sulla temperatura dell'acqua, media di 35.4 °C e quindi più precisamente classificata come “mesotermale” (temperatura 35-50°C); la sua portata media annua è di 8.4 L/s.

[Digitare il testo]

Essa può essere classificata come sorgente per “soglia di permeabilità sovrainposta” (Civita, 2005) trovandosi il Calcare Cavernoso a contatto tramite faglia diretta immergente a E con la formazione dei Galestri e Palombini.

Il monitoraggio *ante-operam*, non svolto direttamente per la presente tesi, si è basato su poche misure di portata su deflussi superficiali e sotterranei che non possono essere ritenute significative per un’esauriente definizione del modello idrogeologico concettuale. Fra l’altro le condizioni di ricarica in condizioni *ante operam* sono state caratterizzate da una situazione di spiccata aridità relativa rispetto alle condizioni medie pluriennali. Infatti, confrontando i valori di precipitazione totale del periodo di ricarica all’inizio dell’anno idrologico (Ottobre-Dicembre) e del periodo di morbida della portata sorgiva (Febbraio-Maggio), relativamente all’anno idrologico 2011/2012 rispetto al trentennio 1985-2014, si osserva che fra Ottobre a Dicembre sono caduti 184 mm di pioggia (41% in meno rispetto al valore medio annuo) mentre fra Febbraio e Maggio sono caduti 200 mm (24% in meno rispetto al valore medio annuo). E, del resto, il monitoraggio idro-biologico *ante-operam*, basato sul calcolo dell’indice I.B.E., segnalava che le comunità macrobentoniche mostravano segni di sofferenza probabilmente dovute alla carenza idrica e alla mancanza di una vera stagione di morbida relativamente all’anno 2012.

Assai più significative sono state le informazioni fornite dal monitoraggio in continuo delle 2 sorgenti principali (*Porcareccia* e *Caldanelle*) e del gruppo di piezometri collocati nel sistema termale dei *Bagni di Petriolo*.

La sorgente “*Porcareccia*”, classificata come sorgente per “limite di permeabilità indefinito” (Civita, 2005), appartiene alla V classe di Meinzer ed è impostata nella formazione del Verrucano. La temperatura dell’acqua la classifica come sorgente fredda. Per quanto riguarda il sistema di flusso essa è risultata del tipo T_L , contraddistinta da valori di portata discreti, anche se al limite per la categoria; il coefficiente d’esaurimento, di valore 0.006 g^{-1} , è indice che il bacino idrogeologico d’alimentazione è relativamente esteso.

[Digitare il testo]

La sorgente “*Le Caldanelle di Petriolo*” rientra nelle sorgenti per “soglia di permeabilità sottoposta” (Civita, 2005) , appartiene alla IV classe di Meinzer ed è impostata nel Calcere Cavernoso. La temperatura dell’acqua permette di classificarla come “mesotermale”, mentre il sistema di flusso è del tipo T_L ma con un valore del coefficiente d’esaurimento pari a 0.004 g^{-1} e quindi indice della connessione con un bacino idrogeologico di maggiore importanza rispetto alla “*Porcareccia*”.

Come risulta dalle curve isovalore interpolate alla zona termale (Cap.15.3) è chiara l’influenza della geologia e delle strutture tettoniche sui parametri dell’escursione piezometrica, della temperatura e della conducibilità elettrica. In particolare la temperatura è influenzata fortemente dalla vicinanza alle strutture tettoniche quali faglie che sono le vie di risalita dei fluidi termali, mentre la conducibilità e l’escursione piezometrica vengono influenzati dalla geologia.

Per entrare nello specifico della potenziale interferenza idrogeologica dei nuovi tratti di galleria in fase di costruzione bisogna tenere conto di diversi fattori. Prima di tutto bisogna analizzare la posizione delle sorgenti rispetto alla ubicazione plano-altimetrica del cavo; in secondo luogo bisogna analizzare in quale formazione sono impostate le sorgenti e quali formazioni sono attraversate dal cavo per comprendere se ci sia una possibile connessione tra la circolazione idrogeologica eventualmente intercettata e quella delle sorgenti, tenendo conto delle caratteristiche della formazione: grado di fratturazione ed alterazione, trasmissività idraulica. In terzo luogo bisogna valutare la classificazione dei sistemi di circolazione idrica sotterranea per capire la loro profondità e rilevanza. Infine va verificato se le idrostrutture che alimentano le sorgenti siano anche intercettate dallo scavo delle gallerie.

Le valutazioni di potenziale interferenza si sono basate sulle evidenze del monitoraggio ambientale delle gallerie TAV Firenze-Bologna, scavate in un *hard rock aquifer* sedimentario (ammasso torbiditico) per molti aspetti analogo alla tipologia idrogeologica del Verrucano.

[Digitare il testo]

Confrontando le quote di progetto delle gallerie con le quote delle sorgenti monitorate si riscontra che le sorgenti più a rischio in termini puramente di localizzazione, ossia quelle che si trovano in alto topografico rispetto alle gallerie, sono “*Porcareccia*”, “AST 01”, “AST 02”. Si ricorda che solo le sorgenti più alte rispetto al piano del ferro, nel caso delle gallerie TAV, sono quelle che hanno subito interferenze idrogeologiche.

Per quanto riguarda la distanza planimetrica delle 3 sorgenti suddette essa è la seguente: 1000 m per la “*Porcareccia*”, 100 m per AST 01 e 140 m AST 02. Confrontando queste distanze con quelle delle sorgenti impattate dalle gallerie della TAV, dove 2/3 delle sorgenti impattate presentavano una distanza dalla galleria inferiore a 700 m, si considera tale valore come una soglia di rischio accettabile.

Da un punto di vista idrogeologico l’acquifero principale dell’area (Calcere Cavernoso) è intercettato dalla galleria “Greppoli” per un totale di 150 m e dalla galleria “Casal di Pari” dove ne è previsto l’attraversamento per altrettanti 150 m, in una zona interessata da importanti strutture tettoniche quali faglie inverse che lo mettono a contatto con le altre unità.

Per quanto riguarda l’unità del Verrucano non si ravvede nessun rischio di interferenza con i sistemi di circolazione idrica superficiale che alimentano le sorgenti AST 02, AST 04, AST 05, AST 06 mentre “*Porcareccia*”, AST 01, AST 10, legate ad uno stato di rilevante fratturazione dell’area, come testimoniato anche dalle risalite profonde termali, vengono ritenute più vulnerabili.

[Digitare il testo]

Punto d'acqua	ΔH (m)	ΔL (m)	Unità	Tipo	Connessione
Sorg. Caldanelle	-111	730	CV	TL	No
Sorg. Porcareccia	26	1000	Ve	TL	No
Sorg. AST01	84	100	Ve	\	Sì
Sorg. AST02	37	140	Ve	\	No
Sorg. AST04	-135	960	Ve	\	No
Sorg. AST05	-130	1080	Ve	SL	No
Sorg. AST06	-140	1240	Ve	SL	No
Sorg. AST10	-163	1250	Ve	\	No
T.Farma	-160	920	Ve	\	No

Fig.17.1- Tabella riassuntiva dei fattori d'impatto collegati alle sorgenti. Il rosso indica che il fattore induce una condizione di rischio, il verde che sicuro non la induce. ΔH indica la differenza di quota tra la sorgente e il piano galleria; ΔL la distanza planimetrica dall'asse della galleria; Unità è relativa alla formazione in cui è impostato il punto d'acqua; Tipo fa riferimento alla classificazione in base al sistema di flusso; Connessione indica se c'è collegamento tra l'idrostruttura della sorgente e la galleria.

In Fig.17.1 vengono riassunti i 5 fattori d'impatto collegati alle sorgenti monitorate. Maggiori sono le caselle rosse e maggiore, in termini relativi, è il rischio di impatto della sorgente. Si ritiene che se la sorgente presenta tutte e 5 le caselle rosse l'impatto è probabile, se ne presenta 4 l'impatto è possibile, se ne presenta meno di 4 non si ravvedono particolari situazioni di criticità (in termini probabilistici).

Riguardo alla circolazione idrica nel Verrucano abbiamo solo una sorgente considerata con impatto possibile, ossia la AST 01 la quale ha 4 fattori a rischio su 5. La sorgente "Porcareccia" viene classificata invece a impatto poco probabile avendo 3 fattori a rischio su 5 e le restanti sorgenti non sono considerate a rischio.

E' da sottolineare però che nel caso sia delle sorgenti AST 01, AST 02, AST 04 e AST 10 il fattore "Tipo" non è stato determinato per mancanza di sufficienti dati di portata. Per quanto riguarda il T. Farma non è previsto nessun impatto. Nel Calcare Cavernoso l'unica sorgente è quella "Le Caldanelle di Petriolo" la quale pure presenta 3 fattori esposti a rischio e quindi viene considerata a impatto poco probabile.

Le considerazioni suddette sulle potenzialità di impatto hanno potuto avere una parziale conferma dato che, al momento della stesura finale di questa tesi, la galleria "Casal di Pari" era stata scavata per un tratto pari al 35% mentre la galleria "Greppoli" è stata ultimata ad Aprile 2014.

[Digitare il testo]

Di fatto non si sono riscontrate interferenze né da parte della galleria “Greppoli” né da parte della galleria “Casal di Pari”, dove, su un totale di lunghezza di progetto di 1.7 km, sono stati scavati circa 300 m da ogni fronte di scavo quindi per un totale di 600 m senza incontrare venute d’acqua rilevanti; lo scavo ha interessato dall’imbocco sud la formazione del Verrucano e dall’imbocco nord la formazione dei Galestri e Palombini (acquitardo).

Non è stata comunque ancora intercettata la formazione del Calcere Cavernoso, ritenuto l’acquifero di maggior importanza e quindi la più vulnerabile ad un eventuale interferenza idrogeologica. Il Calcere Cavernoso verrà intercettato dalla progressiva Pk 5+000 alla Pk 5+150.

La valutazione di rischio di impatto effettuata mette comunque in evidenza che 2 delle sorgenti a maggiore rischio relativo (3 caselle rosse su 5) sono quelle attentamente monitorate con un monitoraggio in continuo che segnalerà eventuali interferenze o diminuzioni di portata. Tali interferenze sono considerate comunque, alla luce delle valutazioni fatte, poco probabili.

La sorgente maggiormente a rischio risulta essere la AST 01 (4 caselle rosse su 5) per la quale invece è in svolgimento solo un monitoraggio in discontinuo e quindi verrebbe consigliato un monitoraggio più accurato per individuare possibili interferenze.

BIBLIOGRAFIA

Boccaletti M., Conedera C., Dainelli P. & Gočev P., 1982. “The recent (Miocene- Quaternary) regmatic system of the Western Mediterranean region: a new model of ensialic geodynamic evolution, in a context of plastic/rigid deformation”. *Journal of Petroleum Geology*, 5, Issue 1, 31–49.

Boccaletti M., Ciaranfi N., Cosentino D., Deiana G., Gelati R., Lentini F., Massari F., Moratti G., Pescatore T., Ricci Lucchi f. & Tortorici L., 1990. “Palinspastic restoration and paleogeographic reconstruction of the peri-Tyrrhenian area during the Neogene”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77, 41-50.

Bortolotti V., 1992. “Domini paleogeografici precoci”. In: *Appennino Tosco-Emiliano. Guide Geologiche Regionali S.G.I., BE-MA editore*, 4, pp.331.

Burgassi P.D et al. 1979. Esame dei rapporti fra le formazioni metamorfiche del basamento nella Toscana a sud dell’Arno.

Civita M., 1973. “Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di captazione”. *Memorie e Note Istit. Geol. Appl., Napoli*, 12,1-34.

Civita M., 2005. “Idrogeologia applicata ambientale”. Casa Editrice Ambrosiana.

Cesano D., Olofsson B. & Bagtzoglou A.C. 2000. Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels - a statistical study of the Bolmen Tunnel in southern Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2): 153-165.

Day M.J. 2004. Karstic problems in the construction of Milwaukee’s Deep Tunnels. *Environmental Geology*, 45(6): 859-863.

Custodio E. *Hydrologia subterranea*.

Feinstein D.T., Dunning C.P., Hunt R.J. & Krohelski J.T. 2003. Stepwise use of GFLOW and MODFLOW to determine relative importance of shallow and deep receptors. *Ground Water* 41(2): 190-199.

[Digitare il testo]

Fiocco M. e Ilardo I., 2012. Relazione geologica, indagini e rilievi, geologia e idrogeologia.

Gargini A. (Ed.), 2009. “Le gallerie TAV attraverso l’Appennino toscano: impatto idrogeologico ed opere di mitigazione”. Industrie Grafiche della Pacini Editore.

Gargini A., Piccinini L., Martelli L., Rosselli S., Bencini A., Messina A. & Canuti P. 2006. Idrogeologia delle unità torbiditiche: un modello concettuale derivato dal rilevamento geologico dell’Appennino Tosco-Emiliano e dal monitoraggio ambientale per il tunnel alta velocità ferroviaria Firenze-Bologna. Bollettino della Società Geologica Italiana, 125: 293-327.

Gargini A., Vincenzi V., Piccini L., Zuppi G.M. & Canuti P., 2008. “Groundwater flow systems in turbidites of the Northern Apennines (Italy): natural discharge and high speed railway tunnel drainage”. Hydrogeology Journal

Gelati Romano, 2013. Storia geologica del paese italia.

Goodman R. F., Moye D. G., Van Schaikwyk A. & Javandel I., 1965. Ground water inflows during tunnel driving. Bulletin of the International Association of Engineering Geologists 2, 1, 39-56.

Ii H. & Kagami H. 1997. Groundwater level and chemistry changes resulting from tunnel construction near Matsumoto City, Japan. Environmental Geology, 31(1-2):76-84.

Kitterod N.O., Colleuille H., Wong W.K. & Pedersen T.S. 2000. Simulation of groundwater drainage into a tunnel in fractured rock and numerical analysis of leakage remediation, Romeriksporten tunnel, Norway. Hydrogeology Journal, 8(5): 480-493.

Kolymbas D. & Wagner P. 2007. Groundwater ingress to tunnels - The exact analytical solution. Tunnelling and Underground Space Technology, 22(1): 23-27.

Lazzarotto A. (1993). Elementi di geologia. In: La storia naturale della Toscana meridionale, Piza ed. Milano.

[Digitare il testo]

Lee I.M., Nam S.W. & Ahn J.H. 2003. Effect of seepage forces on tunnel face stability. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2): 342-350.

Signorini R. 1966. Il Verrucano nella Toscana meridionale, sta in “Atti del Symposium sul Verrucano”, sett. 1965 Pisa.

Sjolander-Lindqvist A. 2005. Conflicting perspectives on water in a Swedish railway tunnel project. *Environmental Values*, 14(2): 221-239.

Marechal J.C. & Perrochet P. 2003. New analytical solution for the study of hydraulic interaction between Alpine tunnels and groundwater. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 174(5): 441-448.

Molinero J., Samper J. & Juanes R. 2002. Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks. *Engineering Geology*, 64(4): 369-386.

Perrochet P. 2005. Confined flow into a tunnel during progressive drilling: An analytical solution. *Ground Water*, 43(6): 943-946.

Perrochet P. & Dematteis A. 2007. Modeling transient discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous formation. *Ground Water*, 45(6): 786-790.

Yang S.Y. & Yeh H.D. 2007. A closed-form solution for a confined flow into a tunnel during progressive drilling in a multi-layer groundwater flow system. *Geophysical Research Letters*, 34(7): L07405.

Yoo C.S. 2005. Interaction between tunneling and groundwater - Numerical investigation using three dimensional stress-pore pressure coupled analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,