



S.E. Prefetto di Latina
prefettura.preflt@pec.interno.it

Sindaco
del Comune di Formia
protocollo@pec.cittadiformia.it

Sindaco
Comune di Gaeta
comunedigaeta@pec.gedea.it

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino
Centrale
protocollo@pec.autoritadistrettoac.it

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino
Meridionale
protocollo@pec.distrettoappenninomeridionale.it

Regione Lazio
Area Conservazione e Tutela
Qualità dell'Ambiente
direzioneambiente@regione.lazio.legalmail.it

Regione Lazio
Direzione Regionale Risorse Idriche,
Difesa Del Suolo E Rifiuti
direzioneacquaesuolo@regione.lazio.legalmail.it

Direzione ASL Latina
protocolloaoo10@pec.ausl.latina.it
p.lucantonio@ausl.latina.it

Provincia di Latina
Settore Ecologia e Ambiente
ufficio.protocollo@pec.provincia.latina.it

Segreteria ATO4
segreteria@pec.ato4latina.it

MNL
gr bhe

ACQUALATINA S.p.A. - Viale P.L.Nervi snc - C. Com. Latinafiori - torre 10 Mimose - 04100 Latina
tel.: 0773 642 - fax: 0773 472074 - e-mail: acqualatina@acqualatina.it - Cap.Soc. € 23.661.533,00 i.v.
Registro Imprese di Latina R.E.A. 146544 - P.IVA e C.F. 02111020596



Prot. n. 3167 del 21/01/2020 (A) 1



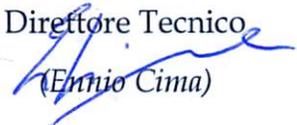
Oggetto: *Campo pozzi "25 Ponti" nel Comune di Formia*
Trasmissione Relazione intermedia Università di Roma La Sapienza

Con riferimento al recente incontro del 09/01/2020, in occasione del tavolo tecnico permanente istituito presso la Prefettura di Latina, si trasmette unitamente alla presente la relazione intermedia redatta dal Prof. Ing. Giuseppe Sappa, dell'Università di Roma La Sapienza (Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - Area di Geologia Applicata), riguardo l'aggiornamento dello studio in corso per le attività di monitoraggio del campo pozzi "25 Ponti" nel Comune di Formia.

I migliori saluti

Acqualatina S.p.A.

Il Direttore Tecnico


(Ennio Cima)



ACQUALATINA S.p.A. - Viale P.L.Nervi snc - C. Com. Latinafiori - torre 10 Mimose - 04100 Latina
tel.: 0773 642 - fax: 0773 472074 - e-mail: acqualatina@acqualatina.it - Cap.Soc. € 23.661.533,00 i.v.
Registro Imprese di Latina R.E.A. 146544 - P.IVA e C.F. 02111020596



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE EDILE E AMBIENTALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

**Aggiornamento Report attività di monitoraggio campo Pozzi
zona “25 Ponti”**

Dicembre 2019

Prof. Ing. Giuseppe Sappa

Dott. Ing. Silvia Iacurto

Dott. Ing. Francesco Maria De Filippi



INDICE

1.	PREMESSA	2
2.	INTRODUZIONE	2
3.	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	2
4.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO	3
5.	ATTIVITÀ SVOLTE	5
5.1.	ANALISI CHIMICO-FISICHE SUI CAMPIONI PRELEVATI (POZZO TULLIOLA)	8
5.2.	ANALISI CHIMICO-FISICHE SUI CAMPIONI PRELEVATI (POZZO TEREZIA)	10
5.3.	ANALISI DEI RISULTATI: VALUTAZIONE DEL PROCESSO DI INTRUSIONE SALINA MONITORAGGIO 2017	11
5.4.	ANALISI DEI RISULTATI: VALUTAZIONE DEL PROCESSO DI INTRUSIONE SALINA MONITORAGGIO 2019	16
6.	CONCLUSIONI	20

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Stralcio ripresa satellitare dell'area d'interesse (Google Earth 2017) e delle CTR n. 415123 e 415112 (scala 1:5.000) ...	3
Figura 2 - Inquadramento geologico dell'area di studio	4
Figura 3 - Modello sperimentale del Dott. Geol. Giovanni De Caterini (Interim Report 10 - 07/01/2020)	5
Figura 4 - (a) Pozzo Tulliola; (b) Pozzo Terenzia	6
Figura 5 - Cronoprogramma attività di monitoraggio campo pozzi "25 Ponti", luglio 2019 - ottobre 2019	7
Figura 6 - Grafico Cl ⁻ vs. rapporto Na ⁺ /Cl ⁻	12
Figura 7 - Grafico Na ⁺ vs. Cl ⁻	12
Figura 8 - Grafico Ca vs. Cl ⁻	13
Figura 9 - Grafico rapporto Cl ⁻ / HCO ₃ ⁻ vs. Cl ⁻	14
Figura 10 - "Hydrochemical Facies Evolution Diagram" (HFE-D) dei campioni di acqua sotterranea presi dal pozzo Tulliola	15
Figura 11 - Diagramma di Piper dei campioni di acqua sotterranea presi nel pozzo Tulliola nel corso del monitoraggio 2017 (modificato come D. Kelly per la valutazione dell'intrusione salina, 2006)	16
Figura 12 - Grafico Cl ⁻ vs. rapporto Na ⁺ /Cl ⁻ (luglio 2019 - ottobre 2019)	17
Figura 13 - Grafico Na ⁺ vs. Cl ⁻ (luglio 2019 - ottobre 2019)	17
Figura 14 - Grafico Ca vs. Cl ⁻ (luglio 2019 - ottobre 2019)	18
Figura 15 - Grafico rapporto Cl ⁻ / HCO ₃ ⁻ vs. Cl ⁻ (luglio 2019 - settembre 2019)	18
Figura 16 - "Hydrochemical Facies Evolution Diagram" (HFE-D) dei campioni di acqua sotterranea presi dal pozzo Tulliola (a) e Terenzia (b)	19
Figura 17 - Diagramma di Piper dei campioni di acqua sotterranea presi nei pozzi Tulliola e Terenzia da luglio 2019 a settembre 2019 (modificato come D. Kelly per la valutazione dell'intrusione salina, 2006)	20

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Risultati delle analisi chimico-fisiche delle acque sotterranee campionate nel pozzo Tulliola (agosto 2017-novembre 2017)	8
Tabella 2 - Risultati delle analisi chimico-fisiche delle acque sotterranee campionate nel pozzo Tulliola (luglio 2019-ottobre 2019)	9
Tabella 3 - Risultati delle analisi chimico-fisiche delle acque sotterranee campionate nel pozzo Terenzia (luglio 2019-ottobre 2019)	10

INDICE DELLE TAVOLE

Tavola 1 - Profilo geologico interpretativo campo pozzi-mare



1. PREMESSA

Il presente documento è stato redatto in seguito alla richiesta di Acqualatina S.p.A. di poter usufruire di un supporto tecnico-scientifico al fine di sopperire, con fonti di approvvigionamento alternativo, ai problemi di magra e di torbidità che interessano periodicamente le opere di captazione del servizio idrico integrato del settore Formia, Gaeta, Minturno e Castelforte. Come già evidenziato nelle relazioni tecniche preliminari ai progetti, redatte dal Dott. De Caterini, l'area dei 25 ponti, oggetto del presente studio, risulta (da letteratura scientifica) particolarmente indicata per una potenziale produttività, ospitando nel sottosuolo la circolazione idrica sotterranea che alimenta le sorgenti sottomarine di Vindicio. Per tale ragione, al fine di poter supplire alle necessità idriche locali, Acqualatina S.p.A. ha proposto la realizzazione di un campo pozzi. Fino ad oggi sono stati costruiti due pozzi: il pozzo Tulliola e il pozzo Terenzia.

Nello specifico, è stato già redatto un Report contenente i risultati del monitoraggio effettuato sul pozzo Tulliola, avvenuto da agosto a novembre 2017. Successivamente, da agosto 2019 a novembre 2019 è stata avviata una seconda fase di monitoraggio sia sul pozzo Tulliola, che sul pozzo Terenzia. Nell'ottica di un sostegno scientifico ai suddetti interventi, atto a limitare, quanto possibile, ogni impatto negativo delle future opere sulla risorsa idrica sotterranea, il DICEA (Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale) dell'Università La Sapienza di Roma, ha analizzato i dati dei campioni di acqua sotterranea, prelevati dai due pozzi, per valutare il potenziale insorgere del fenomeno intrusione salina, atteso che l'acquifero interessato è costiero.

2. INTRODUZIONE

Il progetto "campo pozzi" prevedeva la realizzazione di 6 pozzi, della profondità di almeno 50 m, ciascuno con sezione interna DN355, con lo scopo di raggiungere la portata di sfruttamento di circa 50 l/s pro-capite. Secondo quanto descritto dal "Report 4 – prima analisi dei dati ottenuti dalla prova di portata del pozzo in località 25 ponti", redatto dal Dott. Geol. De Caterini, la realizzazione del pozzo Tulliola, che comprende sia la perforazione che la prima indagine idrogeologica, è stata ultimata l'8 agosto 2017. Tale pozzo è profondo circa 50 m ed è entrato in funzione da Agosto a Novembre 2017, con una portata massima di 50 l/s. Per quanto riguarda invece il pozzo Terenzia, questo è stato completato a fine giugno del 2018, ha una profondità di circa 90 m e, nella prima fase di monitoraggio, non è entrato in funzione. Nella seconda fase di monitoraggio, i cui risultati sono analizzati e riportati nel presente Report, sono stati attivati sia il pozzo Tulliola (pozzo 01) che il pozzo Terenzia (pozzo 03), secondo il cronoprogramma riportato nel paragrafo 5.

3. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

La società Acqualatina S.p.A., gestore del Servizio Idrico Integrato nell'Ambito Territoriale Ottimale n.4 (Lazio Meridionale), a seguito della crisi idrica avvenuta nell'estate nel 2016-2017, ha progettato il campo pozzi, oggetto del presente report, nella zona "25 Ponti", nel comune di Formia, in provincia di Latina. Nello specifico (Figura 1), l'area è ubicata nei pressi di via Cicerone a Formia.

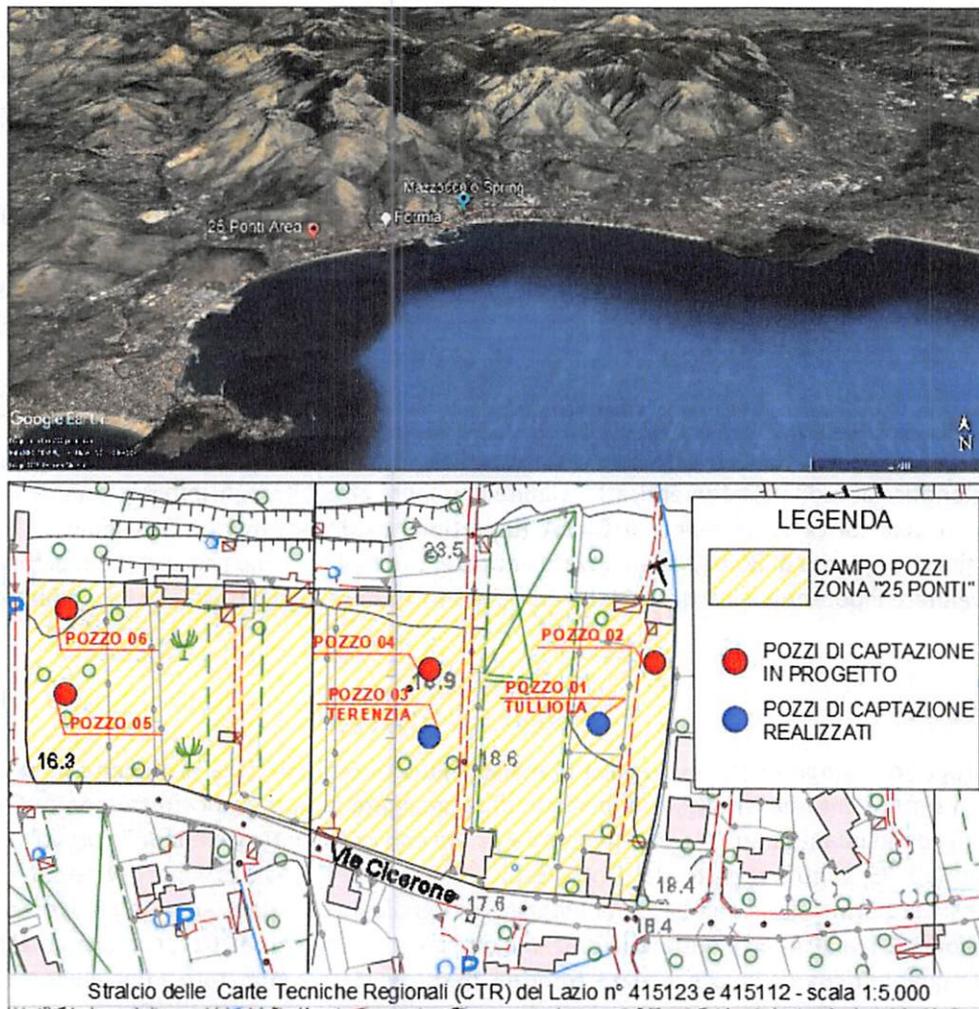


Figura 1 - Stralcio ripresa satellitare dell'area d'interesse (Google Earth 2017) e delle CTR n. 415123 e 415112 (scala 1:5.000)

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

Nell'area di studio, la catena principale dei rilievi montuosi è costituita dai Monti Aurunci, che insieme ai Monti Lepini e ai Monti Ausoni, formano un'unica piattaforma carbonatica, la dorsale dei Volsci. Questa, rappresenta la parte sud-occidentale dell'Appennino laziale-abruzzese. Da un punto di vista geologico, queste montagne sono principalmente costituite da calcare e dolomia. La successione stratigrafica della piattaforma carbonatica, dal basso verso l'alto, è generalmente caratterizzata da una serie carbonatica calcareo-dolomitica (SC) e da una serie carbonatica (Scao) caratterizzata da calcari con detritico-organogeni, a cui si



sovrappongono i Depositi Marni del Pliocene inferiore (P) e i Depositi Quaternari (q) locali, come i conglomerati e l'argilla¹.

I Monti Aurunci sono costituiti da grandi banchi calcarei del Cretaceo che non superano i 1000 metri di spessore. Dal punto di vista idrogeologico, la serie di carbonati che caratterizza i Monti Aurunci ha uno spessore di circa 3000 metri e può essere divisa in due parti: un'area inferiore, per lo più dolomitica e quindi praticamente impermeabile e un'area più alta, con spessore di circa 1000 metri, in gran parte permeabile attraverso fessurazione e carsismo. Questa distribuzione delle caratteristiche di permeabilità favorisce la creazione di bacini sotterranei, generalmente di notevoli dimensioni, contenuti nel complesso calcareo del Cretaceo e delimitati dal complesso dolomitico del Giurassico nelle aree più profonde².

Il ruscellamento superficiale è ridotto grazie alla presenza di molti punti di infiltrazione che drenano l'acqua nel sottosuolo, in modo molto efficace. L'unità idrogeologica della parte occidentale dei Monti Aurunci è costituita da calcari, dolomie calcaree e dolomie del Giurassico e del Cretaceo, che danno origine a sorgenti, alimentate dalle falde acquifere principali. Le più importanti sono: la sorgente Mazzoccolo e la sorgente Capodacqua di Spigno³ (Figura 2).

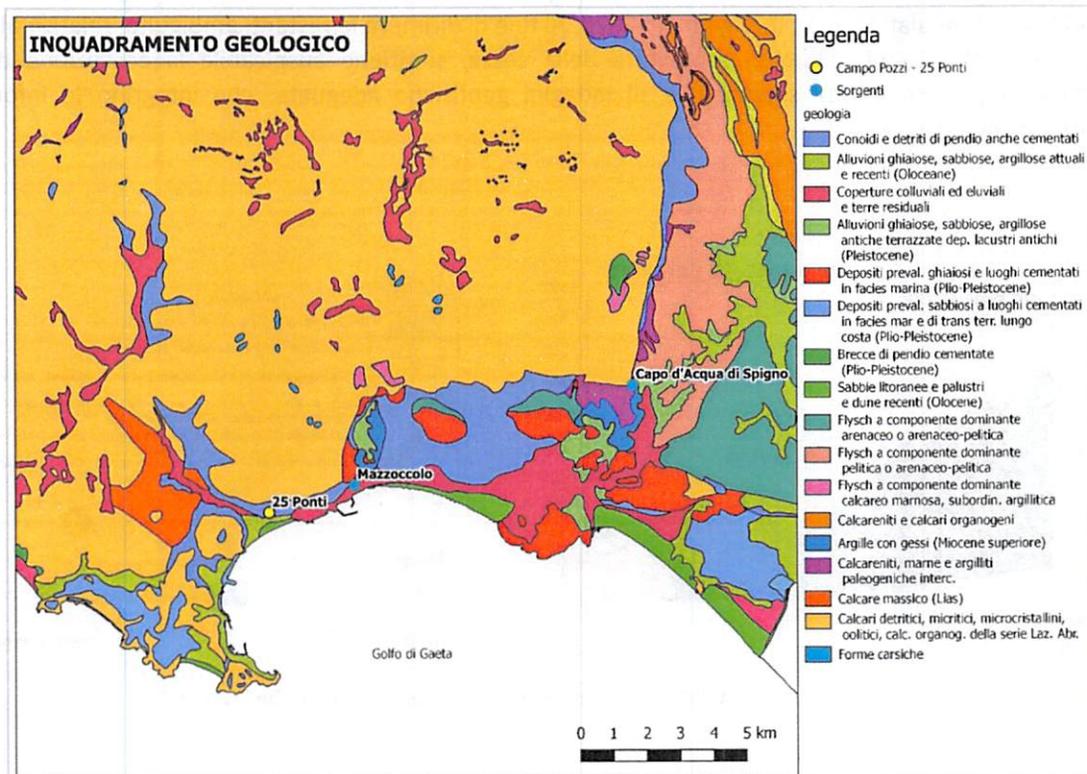


Figura 2 – Inquadramento geologico dell'area di studio

¹ Baldi, A.M.; Marzocchi, A.; Ricci, F., Mencarini S., Vecellio L., Graziosi A., Di Mauro G. La torbidità alle captazioni idropotabili dei monti Aurunci. Aquifer Vulnerability and Risk, 4th Congress on the Protection and Management of Groundwater, Parma, Italia, 21-22-23 settembre 2005

² Bergomi, C.; Catenacci, V.; Cestari G.; Manfredini M.; Manganelli V. Note illustrative della carta geologica d'Italia, foglio 171, Gaeta e Vulcano di Roccamonfina; Poligrafica & Cartevalori: Ercolano (Napoli), Italia, 1969.

³ Celico, P. Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionali, Abruzzo, Molise e Campania); Cassa del Mezzogiorno: Rome, Italia, 1983



Nel dettaglio, l'area in esame è caratterizzata dalla presenza delle seguenti formazioni geologiche, rinvenute durante la perforazione effettuato per l'esecuzione del pozzo Tulliola:

- Uno strato superiore costituito da depositi continentali limosi-sabbiosi (circa 17 metri);
- Uno strato centrale di calcari micritici, calcarenitici e calciruditi fratturati e carsici (circa 8 metri);
- Uno strato inferiore di breccie con clasti calcarei e raramente silicei (più di 50 metri).

Sulla base di quanto detto, è stata ricostruita nella Tavola 1 allegata, la sezione geologica trasversale del pozzo Tulliola fino alla costa. In tale rappresentazione, si può notare che lo strato inferiore è costituito dalla parte satura della falda acquifera, poiché il livello della falda acquifera è di circa 4 m s.l.m. e il pozzo dista circa 500 metri dalla costa. Nella ricostruzione della sezione geologica, le informazioni relative alla stratigrafia, rinvenute nel pozzo Tulliola, sono state estese fino al litorale in mancanza di altre stratigrafie disponibili. A tale proposito la Figura 3 mostra l'ipotesi di sezione geologica che il Dott. Geol. Giovanni De Caterini ha riportato nella carta idrogeologica allegata alla relazione tecnica "Interim Report 10", trasmessa al DICEA da Acqualatina SpA., il ?? gennaio 2020. Al fine di dirimere le restanti ambiguità, relative all'assetto geologico dell'area di studio in prossimità della costa, si ritiene auspicabile la esecuzione di nuove perforazioni, (almeno due sondaggi) e di indagini geofisiche adeguate, che integrino le informazioni stratigrafiche disponibili.

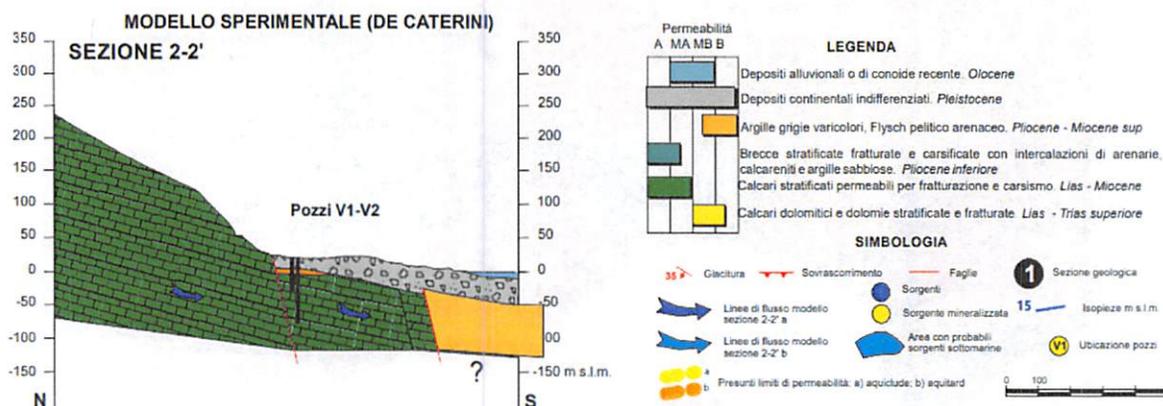


Figura 3 –Modello sperimentale del Dott. Geol. Giovanni De Caterini⁴

5. ATTIVITÀ SVOLTE

Le attività svolte dal personale tecnico del DICEA riguardano l'elaborazione dei dati delle analisi chimico-fisiche, eseguite da Acqualatina S.p.A., sui campioni di acqua sotterranea, prelevati sia nel pozzo Tulliola (vd. Figura 4a) durante il monitoraggio di circa 4 mesi avvenuto nel 2017, sia in entrambi i pozzi durante il monitoraggio del 2019 (agosto 2019 - ottobre 2019).

⁴ (Interim Report 10 – 07/01/2020)



(a)



(b)

Figura 4 – (a) Pozzo Tulliola; (b) Pozzo Terenzia

Nello specifico, le attività di monitoraggio effettuate sui due pozzi, nell'anno in corso, riguardano inizialmente le prove a gradini e le prove di portata (luglio 2019); successivamente i due pozzi sono stati captati prima solamente di notte, dalle ore 19.00 alle ore 9.00, e dopo in continuo (h24), secondo quanto descritto nel cronoprogramma riportato in Figura 5.



Attività	lug-19				
	7	14	21	28	31
Prove a gradino (5 - 11 - 13 l/s)	■	■			
Prove di portata					■

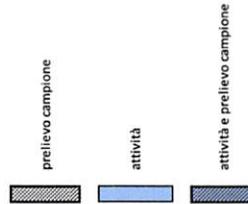
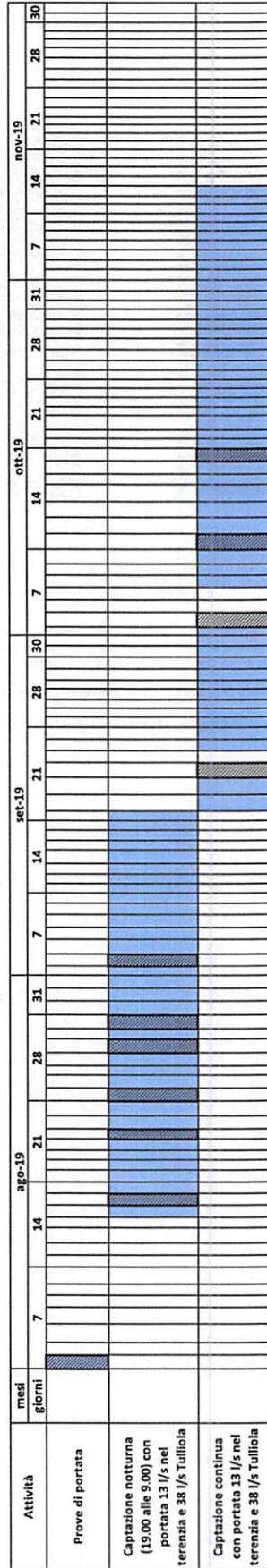


Figura 5 – Cronoprogramma attività di monitoraggio campo pozzi "25 Pontir", luglio 2019 - ottobre 2019



5.1. ANALISI CHIMICO-FISICHE SUI CAMPIONI PRELEVATI (POZZO TULLIOLA)

I campioni di acqua sotterranea, sottoposti ad analisi chimico-fisiche, descritte nel presente paragrafo, provengono dal pozzo Tulliola dal personale tecnico della società Acqualatina S.p.A.. In Tabella 1 sono riportati i risultati analitici relativi ai campioni prelevati nel primo monitoraggio effettuato dal 01/08/2017 fino al 20/11/2017, mentre in Tabella 2 i risultati dei campioni presi nell'arco temporale che va dal 10/07/2019 fino al 14/10/2019.

Data	EC	Na ⁺	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Durezza _{tot}
(gg/mm/aaaa)	(μS/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(F°)
01/08/2017	607	27.3	44.7	62.9	11.3	30.6	16.3	20
08/08/2017	661	19.6	42.8	86.3	12.9	27.8	17.6	39
25/08/2017	661	29.9	56.8	88.6	15.7	27.2	14.8	29
30/08/2017	644	20.5	43.3	83.3	12.5	32.3	17.4	26
31/08/2017	664	16.7	44.2	72.9	9.8	30.1	18.6	22
01/09/2017	662	18.1	45.4	75.4	10.2	30.4	18	23
14/09/2017	663	20.5	48.1	88.1	12.9	31.5	18.6	27
18/09/2017	684	23.2	55	95	14.1	29.6	16.3	30
02/10/2017	740	23.9	80.9	92.9	13.4	30.2	16.5	29
10/10/2017	764	30.3	91.2	120.6	17.8	29.6	15	37
02/11/2017	835	33.3	123.2	111.2	15.3	29.8	14.3	34
08/11/2017	843	32.4	122.2	112.5	16.4	30.2	13.4	35
13/11/2017	835	32.4	122.6	113.1	16	29.9	13.1	35
20/11/2017	846	36.7	136.7	116.4	16.3	29.8	12.9	36

Tabella 1 – Risultati delle analisi chimico-fisiche delle acque sotterranee campionate nel pozzo Tulliola (agosto 2017-novembre 2017)



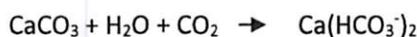
Data	EC	Na ⁺	K	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
(gg/mm/aaaa)	(μS/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
10/07/2019	683	32.1	2.3	83.3	89.6	17.2	27.6	16.2	-
30/07/2019	737	34.9	2	92.2	106.1	18	25.5	13.2	305
31/07/2019	759	35.8	3.1	99.5	110.7	18	26	13.1	299
01/08/2019	766	38.9	1.9	120.9	112.4	18.3	26.9	12.9	299
13/08/2019	749	35.2	2.1	80	110.9	17.8	21.8	10.9	305
19/08/2019	766	36.9	1.8	100.7	111.9	18.4	25.9	12.3	293
22/08/2019	767	38.1	1.9	101.3	112.8	18.8	26.1	12	302
26/08/2019	769	40.4	1.8	102.5	113.8	18.5	26.1	11.6	293
28/08/2019	765	39.8	2	102.7	112.1	18.4	26	11.9	293
02/09/2019	760	36.3	1.7	125.5	107.6	18	32.5	14.7	299
02/10/2019	754	39.8	1.7	94	111.3	17.7	24	8.5	-
08/10/2019	761	38.1	1.8	106.3	97.7	18.3	24	9.1	-
14/10/2019	761	38.1	1.8	105.5	90	18.1	27.4	11.2	-

Tabella 2 – Risultati delle analisi chimico-fisiche delle acque sotterranee campionate nel pozzo Tulliola (luglio 2019-ottobre 2019)

Il monitoraggio ordinario, effettuato dal 01/08/2017 fino al 20/11/2017, non ha previsto la determinazione dei bicarbonati (HCO₃⁻), che sono invece stati stimati su base stechiometrica. Infatti la durezza totale delle acque sotterranee è data dalla somma della durezza temporanea e di quella permanente, ed è espressa in base al contenuto totale di calcio e magnesio, calcolato come CaCO₃, cioè:

$$1 \text{ grado francese (durezza}_{\text{tot}}) = 10 \text{ mg di CaCO}_3 / \text{litro d'acqua}$$

Dalla misura della durezza totale, conoscendo la concentrazione dell'alcalinità (CaCO₃), è stato possibile calcolare attraverso la reazione chimica, e quindi la conversione, riportata di seguito, il valore stimato della concentrazione di bicarbonati (HCO₃⁻), per ogni campione.



Considerando che la CaCO₃ ha un peso molecolare di 100 g/mol e che l'anione HCO₃⁻ ha un peso molecolare di 61 g/mol: ogni mole di Ca(HCO₃)₂ corrisponde ad una mole di CaCO₃ (100 g) e contiene 2x61g = 122 g di HCO₃⁻. È quindi valida la seguente conversione:

$$\text{HCO}_3^- \text{ (mg/l)} = 1.22 * \text{CaCO}_3 \text{ (mg/l)}$$

Per la seconda fase del monitoraggio, nella consapevolezza che i modelli geochimici, e le elaborazioni utilizzate, sono influenzate dai valori dei bicarbonati, è stato prescritto alla società Acqualatina S.p.A. di determinare anche tali parametri.



I risultati delle analisi chimiche del monitoraggio del 2017 mostrano, per una portata emunta costante di 50 l/s, un trend crescente nel valore della conducibilità elettrica (EC) nel corso dei campionamenti, dovuto all'aumento di alcune concentrazioni di ioni specifici. In particolare, gli ioni cloro (Cl^-) e calcio (Ca^{2+}) mostrano le variazioni più significative. Il contenuto di cloro aumenta, infatti, da 44,7 a 136,7 mg/l da Agosto a Novembre 2017, mentre il contenuto di calcio (Ca^{2+}) presenta valori quasi raddoppiati per lo stesso periodo (da 63 mg/l a circa 116 mg/l). Un lieve aumento è stato registrato anche per quanto riguarda le concentrazioni di sodio (Na^+) e magnesio (Mg^{2+}), sebbene l'aumento risulti non essere sempre lineare. Per quanto riguarda SO_4^{2-} e NO_3^- non sono state invece registrate variazioni sostanziali (Tabella 1). Diversamente per i risultati delle analisi chimiche relative ai campioni presi nella seconda fase di monitoraggio, avvenuta nell'anno in corso, è importante sottolineare che la captazione dei due pozzi non è avvenuta da subito in continuo e che, come riscontrabile in Figura 5, ci sono stati dei giorni di interruzione. Per il pozzo Tulliola, profondo circa 50 m, sfruttato non continuamente, per 38 l/s, possiamo dire che il valore della conducibilità elettrica (EC) si attesta circa sui 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, non mostrando un vero e proprio trend crescente. La conducibilità elettrica e i principali ioni specifici hanno valori superiori a quelli misurati nei primi mesi di monitoraggio del 2017, ma quasi sempre inferiori ai valori massimi misurati a novembre 2017, dopo i tre mesi di captazione in continuo.

5.2. ANALISI CHIMICO-FISICHE SUI CAMPIONI PRELEVATI (POZZO TEREZIA)

Si riportano di seguito i risultati analitici relativi ai campioni prelevati nel pozzo Terenzia, in diversi giorni nell'arco temporale che va dal 10/07/2019 fino al 14/10/2019.

Data	EC	Na^+	K	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-
(gg/mm/aaaa)	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
05/07/2019	980	53.8	3	153.2	134	34.6	83.8	26.7	-
30/07/2019	1035	48.6	2.6	160.8	127.4	34.9	72.9	27.4	311
31/07/2019	1054	56.7	2.5	166.2	130.6	34.8	68.4	26.8	305
01/08/2019	1055	59.2	2.6	171.8	130.1	34.7	68.2	26.3	305
13/08/2019	1045	54.6	2.6	165	129.1	34.5	57.9	22.2	311
19/08/2019	1037	58	2.4	160.5	126.8	33.9	64.1	24.4	314
22/08/2019	1033	59.9	2.4	163.4	127.2	33.4	62.7	24.5	308
26/08/2019	1031	60.4	2.5	157.3	126.5	33.4	64	45.7	311
28/08/2019	1027	60.3	2.5	174.3	127.1	32.9	63.3	25.3	310
02/09/2019	1023	59.4	2.3	178.4	120.3	32.6	72.7	34.4	314
18/09/2019	1048	65.5	3.4	194.1	121.9	32.6	65.9	28.4	305
02/10/2019	1045	62	2.3	161.4	121.2	32.1	58.1	22.6	-
08/10/2019	1047	62.9	2.4	159.1	109.4	32.7	56.8	23.6	-
14/10/2019	1050	64.7	2.3	173.3	123	32.1	60	26.6	-

Tabella 3 – Risultati delle analisi chimico-fisiche delle acque sotterranee campionate nel pozzo Terenzia (luglio 2019-ottobre 2019)



Il valore della conducibilità elettrica (EC) e le concentrazioni di alcuni ioni specifici (Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-}) per il pozzo Terenzia, profondo 90 m, sfruttato non continuamente, per 13 l/s, risultano essere sempre superiori ai valori riscontrati in Tulliola. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che, in tale pozzo, i campioni sono stati prelevati ad una profondità maggiore (circa 60 m) e le acque campionate a tali profondità, risultano più mineralizzate di quelle prelevate nel pozzo Tulliola a circa 40 m dal piano campagna.

5.3. ANALISI DEI RISULTATI: VALUTAZIONE DEL PROCESSO DI INTRUSIONE SALINA MONITORAGGIO 2017

I risultati delle analisi, effettuate sui campioni di acqua sotterranea raccolti durante il 2017, mostrano chiaramente un aumento della concentrazione di alcuni ioni, significativi. Questi incrementi possono essere dovuti all'inizio del processo di salinizzazione delle acque sotterranee nell'area "25 Ponti", causato dall'attivazione del pozzo Tulliola. A tale proposito, è descritto in diversi testi di letteratura che il rapporto tra i principali ioni presenti nell'acqua è fortemente influenzato dall'interazione tra acqua dolce e acqua salata⁵. Ad esempio, ioni come Na^+ e Cl^- svolgono un ruolo chiave nella valutazione del processo di salinizzazione degli acquiferi costieri. Gli effetti del potenziale fenomeno sono stati inizialmente valutati studiando il rapporto $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$; in quanto rapporti inferiori ai valori dell'acqua di mare (0,88) indicano generalmente un segnale di intrusione salina. La Figura 6 mostra i rapporti $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ rispetto alle concentrazioni di Cl^- : i valori dei rapporti per i campioni di acqua analizzati variano da un minimo di 0,39 ad un massimo di 0,94 con un trend negativo correlato chiaramente all'aumento dei volumi emunti.

Solo un campione, raccolto precedentemente all'attivazione del pozzo, presenta un rapporto $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ più alto rispetto a quello relativo all'acqua di mare del Mediterraneo (0,88). Il resto dei campioni presenta valori progressivamente inferiori come già precedentemente accennato. Questo avviene per effetto dello scambio cationico che si verifica quando l'acqua di mare si insinua nelle falde acquifere d'acqua dolce, implicando un deficit di Na^+ e un surplus di Ca^{2+} ⁶.

⁵ Sudaryanto; Nailly, W. Ratio of Major Ions in Groundwater to Determine Saltwater Intrusion in Coastal Areas. Global Colloquium on GeoSciences and Engineering 2017, Bandung, Indonesia, 18–19 October 2017

⁶ Alfarrak, N.; Walraevens, K. Groundwater Overexploitation and Seawater Intrusion in Coastal Areas of Arid and Semi-Arid Regions. Water 2018, 10(22), 143, 10.3390/w10020143.

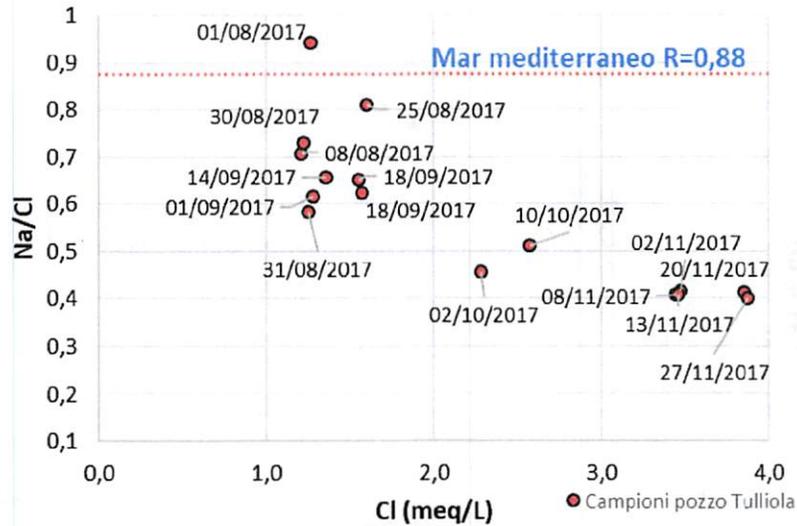


Figura 6 – Grafico Cl⁻ vs. rapporto Na⁺/Cl⁻

Ciò è abbastanza evidente esaminando i diagrammi di dispersione Cl⁻ vs Na⁺ e Cl⁻ vs Ca²⁺, dove i valori di concentrazione di sodio e calcio chiaramente deviano (rispettivamente con un trend negativo e positivo) dai loro valori attesi indicati dalla linea di miscelazione dell'acqua salina-acqua dolce, confermando il fenomeno di scambio cationico, precedentemente accennato (Figura 7 e Figura 8).

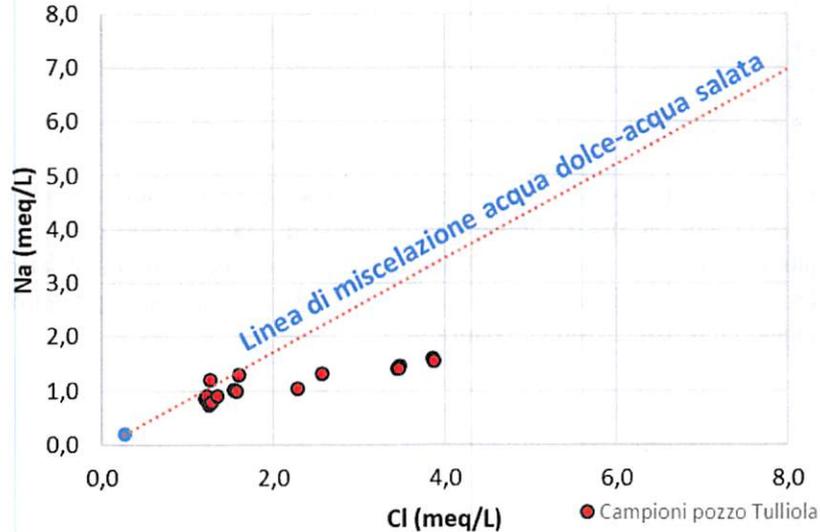


Figura 7 - Grafico Na⁺ vs. Cl⁻

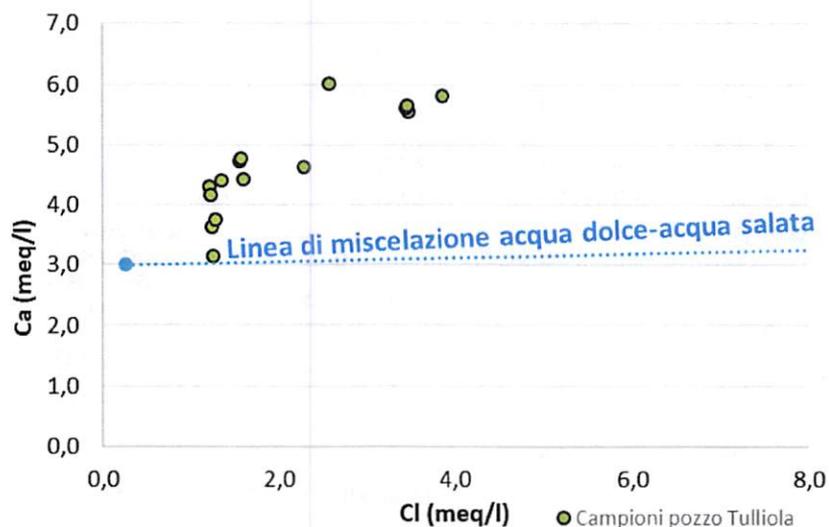


Figura 8 - Grafico Cav. Cl⁻

Si riporta di seguito un ulteriore grafico, solitamente utilizzato in letteratura per classificare il grado di intrusione di acqua di mare, ossia il grafico a dispersione tra il rapporto $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ e il Cl^- ⁷. Tale grafico, come visibile in Figura 9, viene tracciato in funzione delle concentrazioni di Cl^- per definire cinque classi di qualità delle acque sotterranee in funzione della presenza di intrusione salina, secondo il seguente schema:

1. non affetto (< 0.5);
2. leggermente affetto (0.5 – 1.3);
3. moderatamente affetto (1.3 - 2.8);
4. altamente affetto (2.8 - 6.6);
5. fortemente affetto (> 6.6).

Secondo questa classificazione, tutte le acque sotterranee dei campioni prelevati nel pozzo Tulliola sono considerabili come non affette da intrusione di acqua di mare. Si può però riscontrare che con il progredire del volume emunto i valori si avvicinano alla classe “leggermente affetto”, sintomo di una potenziale innesco del processo di intrusione salina, nel caso in cui l'emungimento di acqua dovesse prolungarsi per maggiori intervalli di tempo (Figura 9).

⁷ Sappa, G.; Ergul, S.; Ferranti, F.; Sweya, L.N.; Luciani, G. Effects of seasonal change and seawater intrusion on water quality for drinking and irrigation purposes, in local aquifers of Dear es salaam, Tanzania. Journal of African Earth Sciences 2015, 105, 64-84.

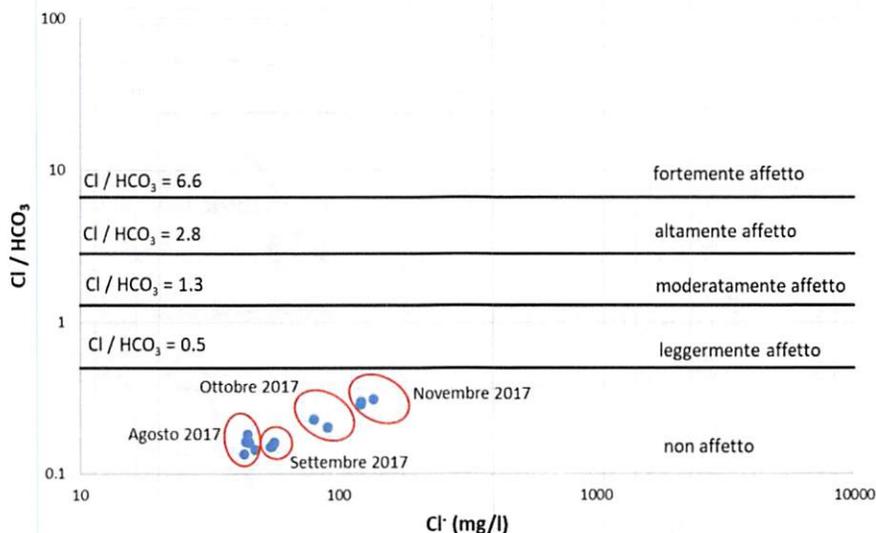


Figura 9 – Grafico rapporto $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ vs. Cl^-

La valutazione dell'intensità del processo di intrusione salina può essere anche valutata con l'aiuto di alcune rappresentazioni grafiche tipicamente utilizzate in letteratura scientifica. Queste sono correlate alle principali caratteristiche chimico-fisiche delle acque sotterranee e consentono di comprendere meglio i processi in corso nella falda acquifera. Ad esempio, molto utilizzato in letteratura scientifica è il diagramma di evoluzione delle facies idrochimiche (Hydrochemical Facies Evolution Diagram: HFE-D), proposto da Giménez-Forcada. Questo diagramma è stato appositamente creato per rappresentare al meglio i principali processi che avvengono negli acquiferi costieri, inclusa la salinizzazione, attraverso uno studio dettagliato dell'evoluzione delle facies idrochimiche. Come è possibile notare in Figura 10, in ascissa sono rappresentate, separatamente, le percentuali di Na^+ e Ca^{2+} in meq/l. Per identificare le reazioni di scambio ionico diretto e inverso, nella costruzione del diagramma, se l'acqua contiene una percentuale di calcio maggiore di quella di sodio, allora viene rappresentata la percentuale di calcio e viceversa. I valori di percentuale di calcio e sodio inferiori a 33%, non sono rappresentati, allo scopo di tracciare le linee delle facies di evoluzione. Tale grafico, infatti, non rappresenta in modo preciso il chimismo delle acque, ma è stato creato per evidenziare la possibile presenza di intrusione salina nelle acque sotterranee. Le ordinate rappresentano invece la percentuale di anioni⁸. In particolare, la percentuale di cloro caratterizza l'acqua di mare e la percentuale di bicarbonato o solfato (a seconda della prevalenza in acqua dolce) caratterizza l'acqua dolce di ricarica.

L'acqua dolce corrisponde generalmente alla facies $\text{Ca-HCO}_3/\text{SO}_4$, mentre l'acqua salina o marina è identificata dalla facies di Na-Cl . L'intrusione di acqua marina è suggerita da un iniziale aumento di salinità e uno scambio inverso di Na/Ca , che è riconosciuto dalla caratteristica facies Ca-Cl . Infine, questo tipo di acqua si evolve verso facies più vicine all'acqua di mare (Na-Cl).

Per il caso specifico, nella Figura 10 è rappresentato il grafico "HFE-D" con i dati relativi ai campioni di acque sotterranee prelevati nel pozzo Tulliola, durante il monitoraggio effettuato nel 2017.

⁸ Giménez-Forcada, E. Dynamic of Seawater Interface using Hydrochemical Facies Evolution Diagram (HFE-D). Ground water 2010, 48(2), 212-16.

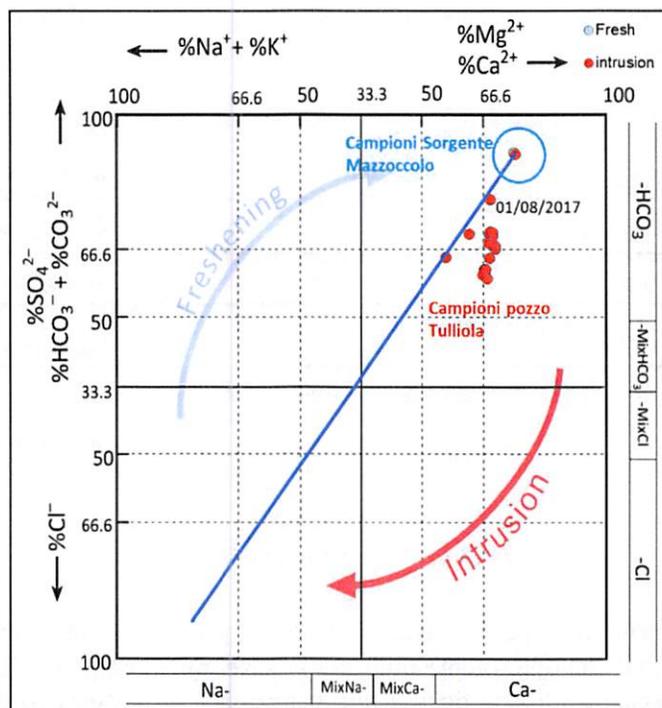


Figura 10 - "Hydrochemical Facies Evolution Diagram" (HFE-D) dei campioni di acqua sotterranea presi dal pozzo Tulliola

In Figura 10 la linea blu rappresenta la evoluzione del grado di mineralizzazione delle acque dolci, per cui i punti che, nel grafico, si discostano da tale linea, indicano processi di salinizzazione, se seguono la curva rossa, mentre testimoniano processi di diluizione se si allineano lungo la curva azzurra. Per questo motivo i punti, relativi ai campioni prelevati nel 2017, che seguono la linea evolutiva verticale, sembrano indicare l'inizio del processo di salinizzazione, dovuto all'emungimento. Infatti è significativo che i campioni di acqua sotterranea, prelevati prima dell'inizio dell'emungimento del pozzo (agosto 2017), presentano caratteristiche chimiche, in termini di salinizzazione, paragonabili a quelle della Sorgente Mazzoccolo (acqua dolce). Questo risultato non indica, come accennato precedentemente, che l'acqua della sorgente Mazzoccolo abbia lo stesso chimismo dell'acqua sotterranea, prelevata nel campo pozzi, ma mostra che i primi campioni di acqua sotterranea, prelevati nel pozzo Tulliola, precedentemente alla fase di emungimento, possono essere rappresentativi delle condizioni "indisturbate", per quanto riguarda il fenomeno di intrusione salina.

Considerazioni simili possono essere espresse riportando i valori idro-chimici delle acque sotterranee in un diagramma di Piper, arricchito per meglio rappresentare il processo di intrusione di acqua marina, da D. Kelly (2006). Diverse aree sono state identificate nel diagramma al fine di aiutare la comprensione dei processi di miscelazione e quelli di intrusione salina. Nel caso di studio dell'area "25 Ponti", tutti i campioni di acqua ricadono nell'area di acqua dolce; si può notare, però, che i campioni di acqua prelevati a Novembre si avvicinano alla fascia corrispondente alla "debole intrusione" (Figura 11).

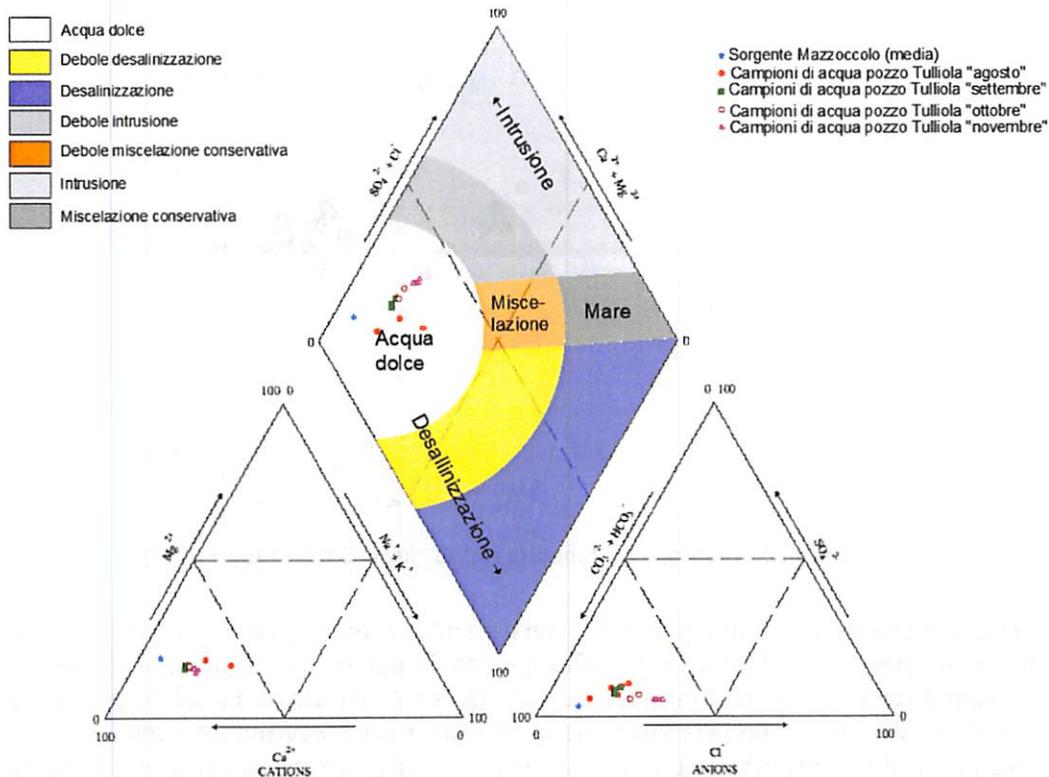


Figura 11 – Diagramma di Piper dei campioni di acqua sotterranea presi nel pozzo Tulliola nel corso del monitoraggio 2017 (modificato come D. Kelly per la valutazione dell'intrusione salina, 2006)

Nello stesso diagramma, sono stati inseriti anche i valori medi dei campioni di acqua relativi alla sorgente Mazzoccolo (stella blu). Tale simbolo, presenta quindi le caratteristiche chimiche tipiche dell'acqua dolce, dovute alla natura carbonatica della sua falda acquifera.

5.4. ANALISI DEI RISULTATI: VALUTAZIONE DEL PROCESSO DI INTRUSIONE SALINA MONITORAGGIO 2019

A valle dei risultati ottenuti dal monitoraggio effettuato sul pozzo Tulliola da Agosto 2017 a Novembre 2017, sono stati analizzati ed elaborati, attraverso l'utilizzo dei medesimi grafici, i risultati ottenuti dai campioni prelevati nei due pozzi da Luglio 2019 ad Ottobre 2019. Gli effetti del potenziale fenomeno sono stati inizialmente valutati studiando il rapporto $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$; in quanto rapporti inferiori ai valori dell'acqua di mare (0,88) indicano generalmente un segnale di intrusione salina. La Figura 12 mostra i rapporti $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ rispetto alle concentrazioni di Cl^- : i valori di questi rapporti, per i campioni di acqua analizzati, variano da un minimo di 0,44 ad un massimo di 0,65 per il pozzo Tulliola, e da un minimo di 0,46 ad un massimo di 0,60 per il pozzo Terenzia, tutti sensibilmente inferiori a 0,88.

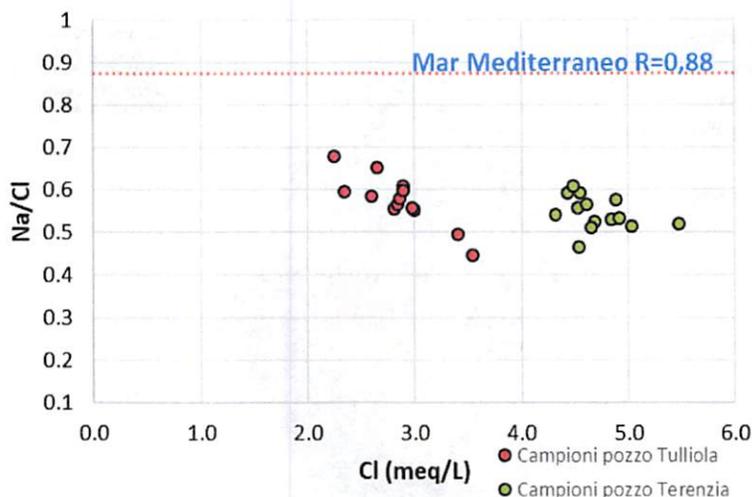


Figura 12 – Grafico Cl⁻ vs. rapporto Na⁺/Cl⁻ (luglio 2019 - ottobre 2019)

Questo fenomeno si verifica per effetto dello scambio cationico, come già accennato nel paragrafo relativo al monitoraggio del 2017, che si verifica quando l'acqua di mare si introduce nelle falde d'acqua dolce, implicando un deficit di Na⁺ e un surplus di Ca²⁺. Ciò è sottolineato anche dai diagrammi a dispersione Cl⁻ vs Na⁺ e Cl⁻ vs Ca²⁺, dove i valori di concentrazione di sodio e calcio deviano (rispettivamente con un trend negativo e positivo) dai loro valori attesi, indicati dalla linea di miscelazione dell'acqua salina-acqua dolce, confermando il processo di scambio cationico (Figura 13 e Figura 14).

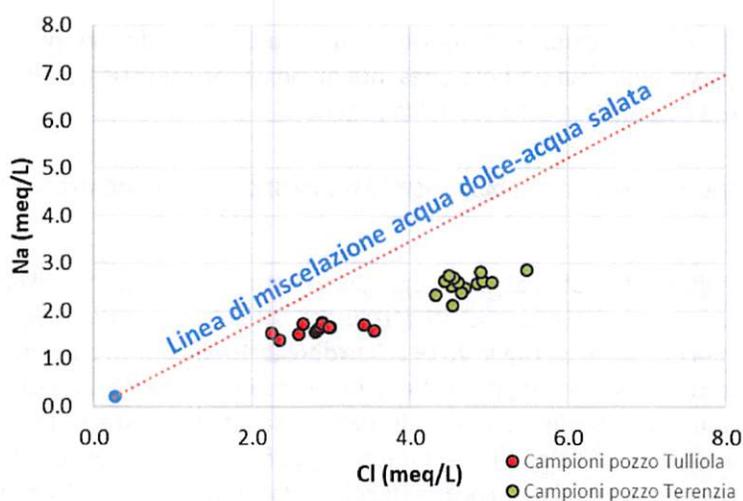


Figura 13 - Grafico Na⁺ vs. Cl⁻ (luglio 2019 - ottobre 2019)

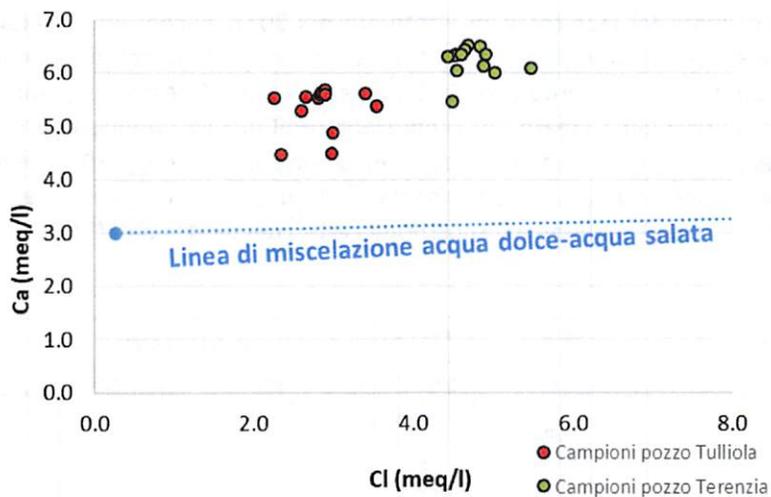


Figura 14 - Grafico Ca vs. Cl⁻ (luglio 2019 - ottobre 2019)

Nel grafico a dispersione tra il rapporto Cl^- / HCO_3^- e il Cl^- sono riportati solo quei campioni per i quali si dispone della determinazione sperimentale della concentrazione dell' HCO_3^- . Secondo la classificazione descritta da tale grafico, e rappresentata nella Figura 15, tutte le acque sotterranee dei campioni prelevati nel pozzo Tulliola, fino a settembre 2019, sono considerabili come non influenzate dall'intrusione di acqua di mare. Si può però riscontrare che alcuni valori relativi a tale pozzo si avvicinano alla classe "leggermente affetto" e che quasi la totalità dei campioni prelevati nel pozzo Terenzia risultano, invece, ricadere in tale classe, sintomo di una potenziale futura intrusione salina, o in ogni caso, che la profondità di captazione del pozzo Terenzia, possa essere in comunicazione con la zona di transizione. La indisponibilità dei valori sperimentali della concentrazione di HCO_3^- per gli ultimi campioni, prelevati da Ottobre a Novembre 2019 durante la captazione in continuo, non consente di svolgere ulteriori e più fondate considerazioni.

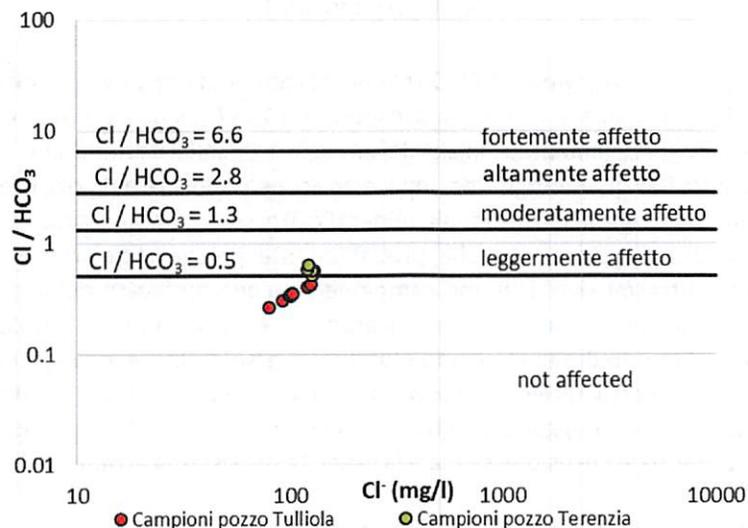


Figura 15 – Grafico rapporto Cl^- / HCO_3^- vs. Cl^- (luglio 2019 - settembre 2019)



Come per i risultati del monitoraggio effettuato nel 2017, anche per i risultati del monitoraggio dell'anno in corso, è stato utilizzato il diagramma di evoluzione delle facies idrochimiche (Hydrochemical Facies Evolution Diagram: HFE-D), proposto da Giménez-Forcada. Questo diagramma, infatti, come già accennato, è stato appositamente creato per rappresentare al meglio i principali processi che avvengono negli acquiferi costieri, inclusa la salinizzazione, attraverso uno studio dettagliato dell'evoluzione delle facies idrochimiche. Anche in questi diagrammi, rappresentati in Figura 16, è stato possibile utilizzare solamente i risultati dei campioni per i quali si hanno a disposizione i valori dei bicarbonati (HCO_3^-).

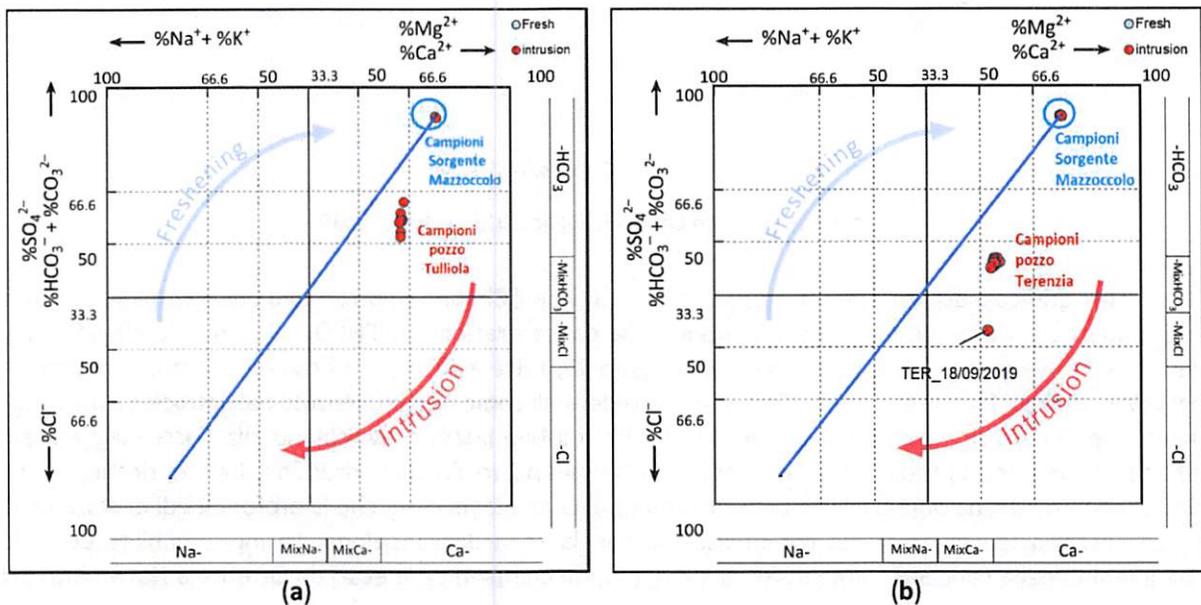


Figura 16 - "Hydrochemical Facies Evolution Diagram" (HFE-D) dei campioni di acqua sotterranea presi dal pozzo Tulliola (a) e Terenzia (b)

Per quanto riguarda il diagramma HFE-D relativo ai campioni presi nel monitoraggio 2019 nel pozzo Tulliola (Figura 16 (a)), si può notare, come già accaduto nel 2017 (Figura 10), una linea evolutiva verso il basso, che evidenzia, progressivamente, l'inizio del processo di salinizzazione che sembra verificarsi per effetto dell'emungimento. Per quanto riguarda, invece, le acque prelevate nel pozzo Terenzia (Figura 16 (b)), è evidente come queste siano, già in partenza, più mineralizzate, sicuramente a causa del fatto che sono state prelevate ad una profondità maggiore, ed anche, probabilmente, perché a tale profondità il pozzo, attraversa un livello litologico meno trasmissivo. L'ultimo campione di acqua prelevato nel pozzo Terenzia, in questa fase di monitoraggio, per il quale si hanno anche i bicarbonati, è il campione del 18/09/2019. Tale campione risulta avere un iniziale aumento di salinità e uno scambio inverso di Na/Ca, riconosciuto dalla caratteristica facies Ca-Cl, che si evolve verso facies più vicine all'acqua di mare (Na-Cl). A tale proposito, si ritiene opportuno attuare fase di monitoraggio aggiuntiva, di almeno tre mesi di captazione in continuo, per poter stabilire l'entità della potenziale intrusione salina e la capacità del sistema acquifero di tornare alle condizioni indisturbate.

Analogamente ai risultati analitici del monitoraggio del 2017, i valori idro-chimici delle acque sotterranee prelevate nei due pozzi, nel 2019, sono stati rappresentati nel diagramma di Piper modificato da D. Kelly (2006), al fine di analizzare al meglio il possibile processo di intrusione di acqua marina. Anche tale



grafico evidenzia come le acque prelevate dal pozzo Terenzia risultano essere più mineralizzate delle acque del pozzo Tulliola, infatti ricadono in parte nell'area "debole intrusione" (Figura 17), avvalorando le ipotesi avanzate in precedenza.

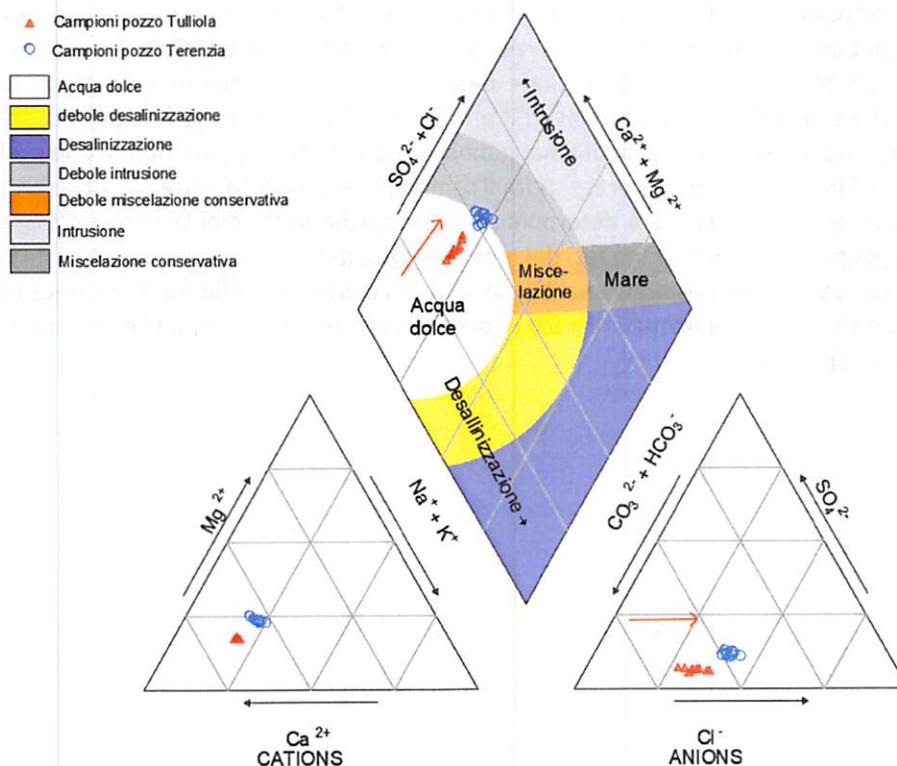


Figura 17 – Diagramma di Piper dei campioni di acqua sotterranea presi nei pozzi Tulliola e Terenzia da luglio 2019 a settembre 2019 (modificato come D. Kelly per la valutazione dell'intrusione salina, 2006)

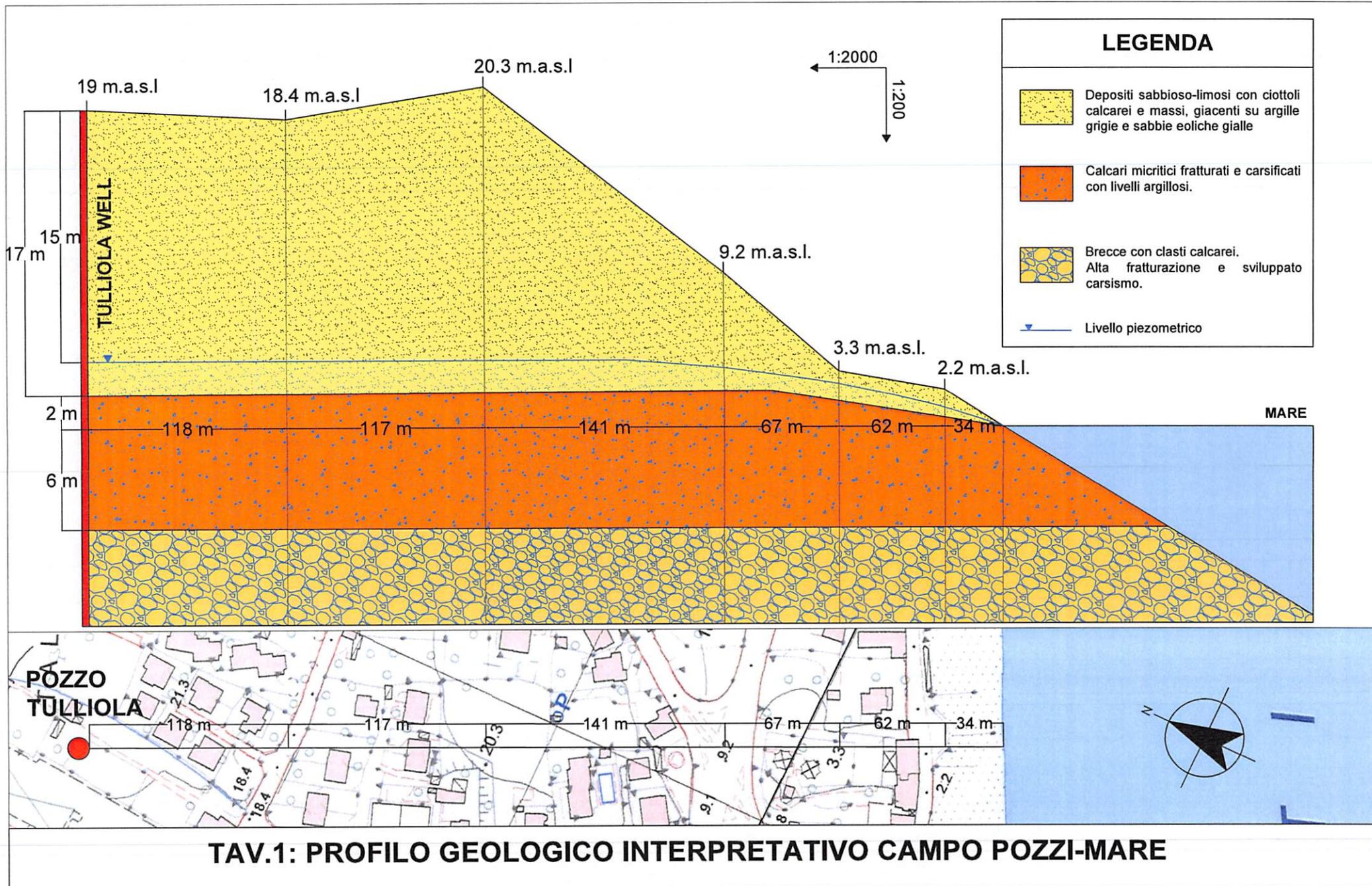
6. CONCLUSIONI

Nell'ambito dell'area di studio, la sorgente Mazzoccolo rappresenta, da un punto di vista qualitativo, la risorsa idrica con le più alte garanzie di qualità, ai fini dello sfruttamento idropotabile. Per le considerazioni fin qui esposte lo sfruttamento del campo pozzi 25 ponti appare possibile, solo con funzione di riserva straordinaria e per limitati periodi di tempo. Infatti, il progetto originale prevede l'installazione di sei pozzi, ed i risultati emersi dai monitoraggi fin qui condotti sembrano indicare che si possano innescare processi di salinizzazione, se l'acquifero costiero interessato dal progetto venga sfruttato eccessivamente e/o per periodi prolungati. Ciò non consente di escludere che l'esecuzione di più pozzi, rispetto agli attuali, sottoposti ad uno sfruttamento più limitato, potrebbe comportare un minore stress per l'acquifero, proteggendolo dall'innesco di potenziali processi di intrusione marina.

Per questi motivi, alla luce di quanto esposto nei paragrafi precedenti, è ragionevole l'attivazione di un'ulteriore fase di monitoraggio dell'acquifero in condizioni di sfruttamento, in modo da consentire una migliore analisi della apparente "lievissima salinizzazione", riscontrata, probabilmente dopo un primo periodo di sfruttamento dell'acquifero costiero carsico, che potrebbe essere anche compatibile con il possibile richiamo di acque profonde, la cui mineralizzazione, comunque, potrebbe non favorire la qualità



attesa per acque potabili. Come concordato con l'Ente gestore Acqualatina S.p.A., tale ulteriore monitoraggio sarà caratterizzato da almeno 3 mesi di captazione in continuo dei due pozzi, da una portata di emungimento di 50 l/s e da una frequenza di prelievo di tre campioni al mese, per ogni pozzo. Nel caso in cui, dalla verifica dei risultati dei diversi campioni prelevati, fossero presenti variazioni significative (deviazione standard >20%), verrà effettuato un ulteriore campionamento mensile. Verranno poi prelevati, per ciascun pozzo, 1 campione aggiuntivo precedentemente all'avvio della captazione, se possibile tramite campionamento statico oppure pochi minuti dopo l'attivazione delle pompe, e 2 campioni al termine dei 90 giorni di monitoraggio. Quest'ultimi, verranno prelevati il primo dopo tre giorni dalla fine della captazione e l'altro dopo nove giorni. Nel corso dell'attività di emungimento sperimentale appare opportuno prelevare specifici campioni dai pozzi in emungimento e presenti fra il campo pozzi e la costa, oltre che di acque di mare e della Sorgente Mazzoccolo da sottoporre a determinazioni isotopiche in termini Deuterio, Ossigeno 18 e Tritio. Oltre a quanto già previsto per le prime fasi del monitoraggio, nella consapevolezza che i modelli geochimici utilizzati nell'elaborazione dei risultati analitici sono particolarmente influenzati da determinati analiti, è stato concordato con la società Acqualatina S.p.A. di analizzare, in tutti i campioni che verranno prelevati, sia i bicarbonati che l'alcalinità.



TAV.1: PROFILO GEOLÓGICO INTERPRETATIVO CAMPO POZZI-MARE