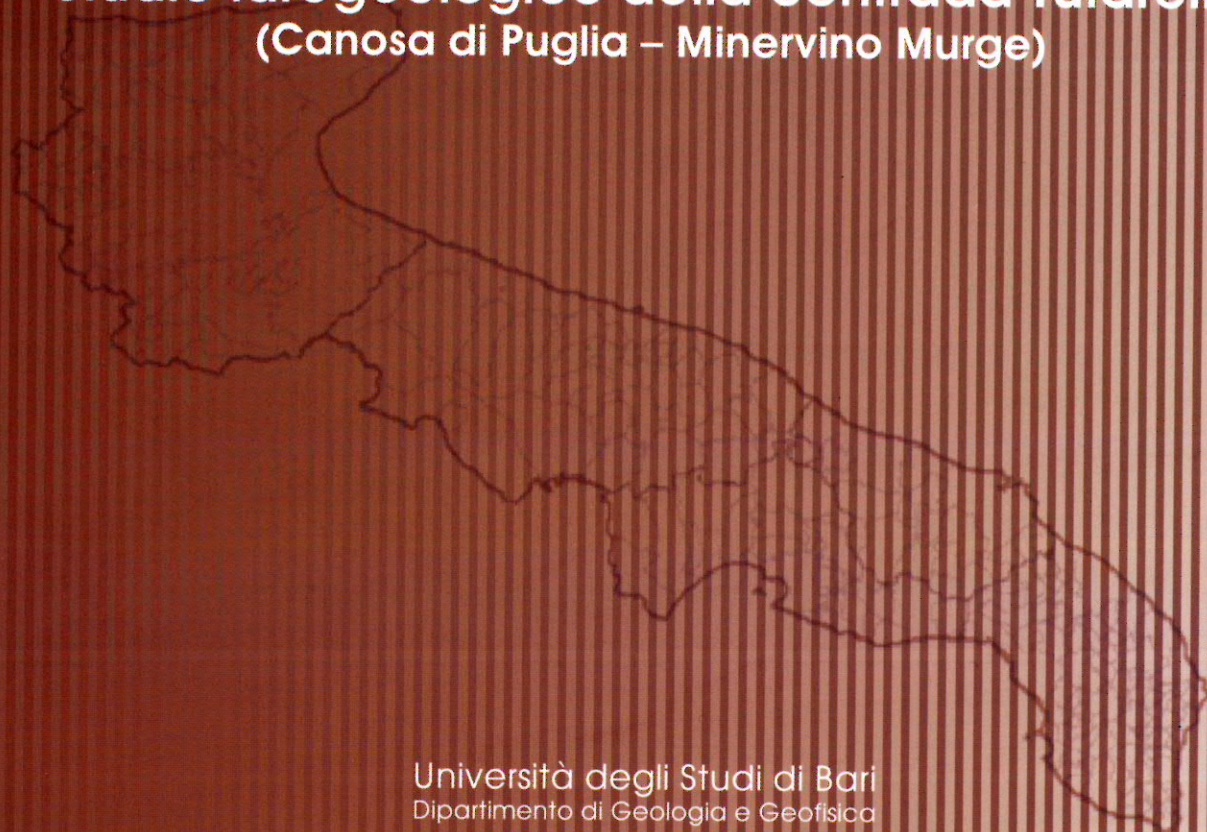


Pietro Pagliarulo



Studio idrogeologico della contrada Tufarelle (Canosa di Puglia – Minervino Murge)



Università degli Studi di Bari
Dipartimento di Geologia e Geofisica



Bleu srl Editore

Università degli Studi di Bari

Dipartimento di Geologia e Geofisica



**Studio idrogeologico della contrada Tufarelle
(Canosa di Puglia – Minervino Murge)**

Bari, 10 maggio 2010

INDICE

1. La contrada Tufarelle	8
2. Inquadramento geologico e idrogeologico	10
3. Il sottosuolo di contrada Tufarelle	20
4. Direzione di flusso delle acque sotterranee	24
5. Composizione geochimica delle acque di falda	31
6. Il sistema di monitoraggio della falda idrica in contrada Tufarelle	43
7. Considerazioni conclusive	49
- Appendice – Valori dei parametri per la caratterizzazione del sottosuolo in contrada Tufarelle	57
- Bibliografia	62

Il presente lavoro di ricerca è stato realizzato nell'ambito di una convenzione tra il Dipartimento di Geologia e Geofisica dell'Università di Bari e la Bleu S.r.l. di Lanciano (CH), stipulata in data 3 marzo 2008.

Il responsabile scientifico della Convenzione

Prof. Pietro Pagliarulo

Il direttore del Dipartimento

Prof. Giuseppe Baldassarre

Bari, 10 maggio 2010

Elenco delle figure:

1. Il bordo delle Murge verso la piana del Fiume Ofanto
2. L'area delle cave in contrada Tufarelle, con l'ubicazione dei pozzi utilizzati per il presente studio
3. Schema geologico regionale
4. Carta geologica dell'area tra Canosa di Puglia e Minervino Murge; Stralcio della carta geologica d'Italia, scala 1:100.000, Foglio 176 – Barletta; Foglio originale consultabile all'indirizzo: http://www.apat.gov.it/Media/carta_geologica_italia/tavoletta.asp?foglio=176
5. Ubicazione dei pozzi di monitoraggio della falda PZ1, PZ2, PZ3 realizzati dalla Bleu S.r.l.
6. Caratteristiche del sottosuolo in corrispondenza dell'impianto della Bleu S.r.l.
7. Dati del rilievo piezometrico effettuato il 2 marzo 2007
8. Distribuzione del carico idraulico della falda (m s.l.m.), ottenuta dal rilievo del 14 maggio 2009
9. Composizione percentuale di acque di differente origine. Costituenti principali: a) anioni; b) cationi
10. Concentrazione dei costituenti principali (milliequivalenti/litro), nel diagramma di confronto di Schoeller
11. Sezione geologica tra la piattaforma carbonatica affiorante (Murge) e l'avanfossa appenninica (Tavoliere di Puglia)
12. Schema costruttivo dei pozzi di monitoraggio PZ1, PZ2, PZ3
13. Campionamento dinamico delle acque sotterranee dai pozzi PZ1 e PZ2
14. Volume di acqua all'interno di un pozzo

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato svolto con la collaborazione della Dott.ssa Livia Emanuela Zuffianò del Dottorato di Ricerca in Geomorfologia e Dinamica Ambientale dell'Università di Bari

Premessa

Il presente lavoro di ricerca intende contribuire alla conoscenza del quadro ambientale della contrada Tufarelle, ricadente al confine tra i comuni di Canosa di Puglia e Minervino Murge, in provincia di Barletta - Andria - Trani (BT) dove sono presenti alcuni impianti per lo smaltimento di rifiuti, gestiti da diverse società.

A causa della presenza degli impianti, le condizioni ambientali dell'area sono motivo di costante preoccupazione per la popolazione residente nei comuni vicini, oltre ad essere state oggetto in passato d'indagini da parte dell'autorità giudiziaria, in riferimento a presunte situazioni di inquinamento legate alle attività di smaltimento e trattamento dei rifiuti.

Una delle maggiori preoccupazioni ambientali in merito alle discariche di rifiuti, riguarda la possibilità che sostanze dannose rilasciate dagli impianti possano inquinare la falda idrica sotterranea; nel caso d'impianti di smaltimento controllato, com'è noto, tale eventualità viene evitata mediante la realizzazione di un sistema per isolare il corpo della discarica dal sottosuolo e dalla falda idrica sottostante (*barriera di impermeabilizzazione*).

Nonostante la presenza della barriera, l'eventualità che gli inquinanti contenuti nella discarica possano inquinare la falda idrica sotterranea non può essere tuttavia considerata, in linea di principio, inammissibile. Una tale eventualità potrebbe infatti derivare dall'inadeguata progettazione o costruzione della barriera, da incidenti o da altro tipo di inconvenienti, verificatisi nel corso della costruzione e del funzionamento della discarica.

Lo stato qualitativo della falda idrica sotterranea, nelle aree dove sono presenti discariche di rifiuti, viene costantemente controllato nel corso dell'attività di smaltimento e, secondo le norme più recenti, anche successivamente.

Per tale finalità di controllo vengono prelevati periodicamente campioni di acqua di falda da pozzi situati nell'intorno della discarica. I campioni vengono sottoposti a una serie molto ampia di determinazioni analitiche per accertare la possibile presenza nelle acque di falda di sostanze inquinanti riconducibili alla discarica, in concentrazioni superiori a specifici limiti di riferimento.

Se la posizione dei pozzi di controllo è scelta in modo adatto, in relazione alla direzione di movimento delle acque sotterranee e alle condizioni di prelievo, se i campioni sono prelevati in modo che conservino quanto più possibile inalterate le caratteristiche dell'acqua di falda, e se gli stessi campioni sono analizzati utilizzando criteri affidabili, i risultati dei controlli, ripetuti nel tempo con appropriata frequenza, forniscono chiare indicazioni circa lo stato qualitativo della falda idrica sotterranea.

La conoscenza approfondita delle condizioni idrogeologiche e idrogeochimiche del territorio dove è ubicato l'impianto di smaltimento è indispensabile per la pianificazione e la realizzazione delle attività di monitoraggio della falda e per l'interpretazione dei risultati delle operazioni di controllo.

Le acque sotterranee di contrada Tufarelle, e di un'ampia zona situata al margine delle Murge in prossimità del Fiume Ofanto, possiedono una composizione geochimica specifica, finora poco studiata. La più evidente peculiarità delle acque sotterranee di questa zona è data dalla natura sulfurea, riscontrata nella maggior parte dei pozzi esaminati nel presente studio.

Tale caratteristica si rileva in contrada Tufarelle, ma anche in una zona più ampia tra Canosa di Puglia, Cerignola e Minervino Murge. In questa zona, assai scarsi sono gli studi effettuati con finalità di ricerca; in generale assai scarsi sono gli studi idrogeologici riguardanti le zone interne dell'acquifero carbonatico delle Murge, sia dal punto di vista delle caratteristiche geochimiche dell'acqua, che delle specifiche proprietà idrodinamiche della falda.

Questo studio si propone di portare elementi di approfondimento riguardanti le caratteristiche naturali delle acque sotterranee in contrada Tufarelle e nelle zone circostanti, con l'obiettivo di fornire un quadro idrogeologico e idrogeochimico di riferimento per le valutazioni riguardanti lo stato qualitativo delle acque di falda. Lo studio ha inoltre l'intento d'illustrare i concetti fondamentali dell'idrogeologia e della idrogeochimica della contrada Tufarelle a un pubblico costituito da quanti, specialisti e non, abbiano interesse ad accertare, o semplicemente a conoscere e ad approfondire, le questioni ambientali riguardanti le acque sotterranee di questo territorio.

Nello studio vengono anche prese in esame le caratteristiche del sistema

di monitoraggio delle acque sotterranee presso l'impianto di smaltimento della Bleu S.r.l., al fine di analizzarne le modalità di funzionamento e la capacità di assicurare un efficace controllo qualitativo delle acque di falda, in riferimento alla specifica situazione idrogeologica del sito. E' necessario tuttavia precisare che lo studio non ha tra le finalità quella di esprimere un giudizio sullo stato qualitativo delle acque di falda, in relazione a eventuali fenomeni di inquinamento da parte degli impianti di smaltimento di rifiuti della zona.

1. La contrada Tufarelle

La contrada Tufarelle, situata al confine tra i territori comunali di Canosa di Puglia e Minervino Murge, deve il nome alla presenza di cave di *tufo calcareo*, roccia porosa e relativamente leggera, lavorabile con facilità in blocchi di forma squadrata (detti "conci"), utilizzati per la costruzione di murature.

Alcune cave di località Tufarelle sono ancora in attività mentre altre, esaurito il materiale utile per l'estrazione, sono oramai in disuso. Alcune delle cave dismesse ospitano impianti per lo smaltimento di rifiuti solidi speciali (impianti Bleu S.r.l. e Cobema S.r.l.). All'interno del comprensorio di cave è anche presente un impianto per il trattamento di rifiuti liquidi (Solvic S.r.l.).

La contrada Tufarelle si trova a metà strada tra le città di Canosa di Puglia e Minervino Murge, dalle quali dista circa 10 Km. La contrada è situata 29 Km dal Mare Adriatico (dal punto in corrispondenza della foce Ofanto) e 120 Km dalla costa del Mare Ionio (nel tratto subito ad Ovest della città di Taranto). La superficie del terreno nella contrada è posta all'incirca tra le quote 100 e 150 metri, sul livello del mare.

Il territorio più vasto, all'interno del quale ricade la contrada Tufarelle, è ubicato in corrispondenza del versante nord – occidentale delle Murge, dove l'altopiano calcareo digrada in direzione NW, verso la piana alluvionale del basso corso del Fiume Ofanto (**figura 1**).

Il comprensorio di cave di località Tufarelle è costeggiato dal Torrente Locone, affluente in destra idraulica del Fiume Ofanto. Nel tratto a monte del

torrente, circa 6 Km a sud della contrada, è presente uno sbarramento, costituito da una diga in terra dell'altezza di 67 metri, che origina un lago artificiale della capacità di 108 milioni di metri cubi d'acqua (diga del Locone). La quota del coronamento della diga è di circa 174 metri s.l.m.

A valle della diga, il corso del torrente è stato notevolmente modificato dagli interventi di sistemazione idraulica connessi alla costruzione dell'invaso artificiale. L'alveo del torrente si presenta come un canale a sezione trapezoidale, rivestito quasi interamente con calcestruzzo, e andamento planimetrico regolarizzato, rispetto all'originario sviluppo naturale. In corrispondenza della parte che bordeggia le cave in località Tufarelle, in un tratto lungo 500 metri circa, l'alveo si presenta inciso nella roccia tufacea, con maggiori caratteri di naturalità.

La quota dell'alveo del torrente Locone è di circa 96 metri sul livello del mare, nel tratto in corrispondenza dell'impianto della Bleu S.r.l.; nel punto di confluenza con il fiume Ofanto, situato 5 Km a nord della località Tufarelle, la quota del torrente, è di 64 m s.l.m.

Nella contrada Tufarelle e nelle zone circostanti sono presenti numerosi pozzi per il prelievo di acque sotterranee, destinati principalmente all'utilizzo in agricoltura.

I pozzi rilevati nel corso di questo studio sono ubicati nella mappa in **figura 1**. Le coordinate planimetriche dei pozzi, riportate nella **tabella 1** nel formato Gauss – Boaga, sono state rilevate mediante strumento GPS portatile e i valori ottenuti possono essere considerati aventi un'incertezza massima di 5 metri.

I pozzi rilevati sono solo una parte di quelli esistenti nell'area esaminata; un rilievo completo sarebbe stato peraltro impossibile da realizzare nell'ambito di un lavoro di ricerca, in relazione alla difficoltà di accesso in aree private e, in generale, alla difficoltà di reperire notizie sull'esistenza stessa dei pozzi. Limitatamente alla contrada Tufarelle, in destra del Torrente Locone, i pozzi individuati rappresentano tuttavia, per quanto è stato possibile accertare, la totalità dei pozzi esistenti (**figura 2**).

La denominazione dei pozzi utilizzata nel presente studio coincide, per quanto possibile, con la designazione utilizzata in altri studi e indagini prece-

denti; nonostante ciò qualche non corrispondenza di denominazione o omonimia potrebbe essere comunque riscontrata. Le coordinate dei pozzi rilevate permettono in ogni caso d'individuare e d'ubicare con precisione i punti su mappa, eventualmente in formato elettronico georeferenziato, risolvendo incertezze di denominazione o di localizzazione dei pozzi.

2. Inquadramento geologico e idrogeologico

Le condizioni geologiche dell'area dove ricade la località Tufarelle s'inquadrano nel contesto geologico regionale della zona compresa tra le formazioni carbonatiche del rilievo delle Murge (*piattaforma carbonatica appula*) e la successione argillosa presente nel sottosuolo della piana del Tavoliere di Puglia (argille subappennine), **figura 3**.

In questo ambito, il tufo calcareo (più appropriatamente identificabile con il nome di "calcareenite di Gravina") segna il passaggio tra la successione carbonatica delle Murge e la successione argillosa del Tavoliere di Puglia (**figura 4**).

La calcarenite di Gravina, d'età pliocenica, affiora lungo il perimetro delle Murge, con spessori in genere di alcune decine di metri. Nell'area di Tufarelle, la calcarenite raggiunge 80 – 85 metri di spessore. L'unità è formata da rocce calcaree con granulometria da fine a grossa, porose, con grado di cementazione variabile e relativamente poco resistenti alle azioni meccaniche; in genere la successione rocciosa si presenta non stratificata e poco fratturata (la distanza tra le fratture è di 20 – 30 metri, come osservabile sui fronti delle cave in contrada Tufarelle).

La formazione della calcarenite di Gravina è riconducibile all'abrasione del substrato calcareo preesistente e alla sedimentazione in ambiente costiero (spiaggia sommersa) di materiale bioclastico, rappresentato da frammenti di gusci di organismi bivalvi, gasteropodi, brachiopodi, echini, ecc.

Al di sotto della calcarenite, la successione carbonatica delle Murge costituisce una sequenza di rocce calcaree e dolomitiche dello spessore di migliaia di metri.

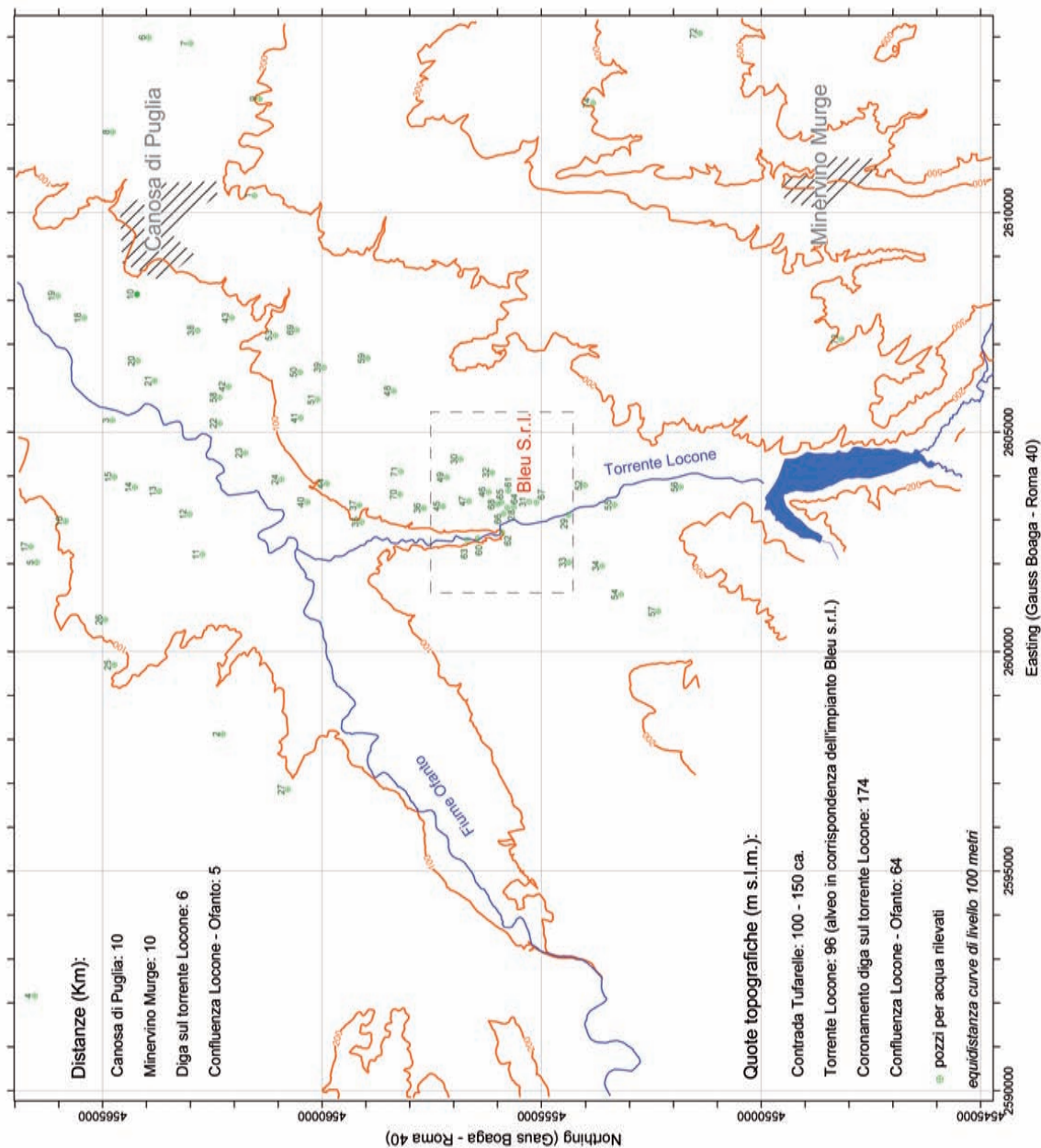


Figura 1 – Il bordo delle Murge verso la piana del fiume Ofanto

#	Nome	E (GB – Roma 40)	N (GB – Roma 40)	Quota (m)
1	19AIM	2610383	4561537	187,96
2	1RTP	2598122	4562259	137,30
3	2IS	2605267	4564776	55,09
4	2RTP	2592163	4566547	127,97
5	3RTP	2602034	4566497	125,38
6	15 C	2613987	4563950	175,00
7	16 C	2613855	4562990	182,00
8	17 C	2611830	4564767	165,00
9	18 C	2612588	4561424	209,00
10	P189	2608132	4564220	87,00
11	P002	2602215	4562724	66,00
12	P003	2603128	4563015	64,80
13	P004	2603651	4563707	63,40
14	P005	2603742	4564263	62,40
15	P006	2603975	4564731	58,50
16	P007	2602968	4565839	93,00
17	P008	2602390	4566635	128,20
18	P009	2607602	4565419	51,70
19	P010	2608101	4566018	48,60
20	P011	2606620	4564198	64,70
21	P012	2606168	4563811	61,00
22	P013	2605197	4562328	72,80
23	P014	2604523	4561743	75,50
24	P015	2603919	4560923	83,30
25	P016	2599697	4564734	106,00
26	P017	2600726	4564937	97,00
27	P018	2596861	4560779	105,00
28	P7	2603275	4555777	135,00
29	Candela	2603115	4554391	112,40
30	Di Muro D.	2604380	4556843	161,90
31	Di Muro G.	2603412	4555279	133,00
32	Di Stasi (1)	2604078	4556119	172,90
33	Di Stasi (2)	2602032	4554377	136,20
34	Di Stasi (3)	2601952	4553622	146,40
35	Ferrara vecchio	2602954	4559097	88,70
36	Ferrara murgetta	2603271	4557679	135,10
37	Ferrara nuovo	2603332	4559148	109,70

#	Nome	E (GB – Roma 40)	N (GB – Roma 40)	Quota (m)
38	G114	2607314	4562840	83,00
39	G263	2606470	4559958	131,60
40	G265	2603403	4560332	84,50
41	G333	2605326	4560482	116,50
42	G335	2606036	4562126	81,00
43	G70	2607604	4562053	81,00
44	G80	2603827	4559887	119,70
45	Lenoci	2603308	4557243	143,50
46	Leone L.	2603634	4556199	153,50
47	Leone S.	2603425	4556650	153,90
48	Leone S.(2)	2605935	4558361	162,40
49	Morra	2603970	4557155	159,30
50	P103	2606361	4560497	122,40
51	P104	2605743	4560102	126,20
52	P107	2603787	4554018	160,00
53	P109	2607198	4561065	110,30
54	P112	2601303	4553196	155,90
55	P113	2603341	4553343	119,50
56	P114	2603752	4551833	130,50
57	P116	2600914	4552348	170,10
58	P97	2605787	4562330	74,20
59	P99	2606682	4558956	155,30
60	Paolicelli	2602581	4556454	93,50
61	Petroni	2603664	4555755	155,90
62	Pinnelli F.	2602720	4555892	99,80
63	Pinnelli P.	2602534	4556692	94,50
64	PZ1	2603293	4555727	135,00
65	PZ2	2603399	4555911	148,80
66	PZ3	2603140	4555860	135,00
67	S.Giorgio	2603397	4555114	134,90
68	Solvic	2603356	4556003	149,90
69	T. Cefalicchio	2607326	4560576	134,00
70	Valle giovane	2603579	4558220	150,50
71	Valle vecchia	2604104	4558202	142,50
72	MM43	2614079	4551397	460,00
73	M044	2607114	4548173	310,00
74	MM11	2612495	4553829	427,00

Tabella 1 – Pozzi rilevati per il presente studio; (coordinate Gauss-Boaga, Roma 40)



Figura 2 – L'area delle cave in contrada Tufarelle, co



on l'ubicazione dei pozzi utilizzati per il presente studio



La successione carbonatica è presente in superficie in corrispondenza dell'altopiano delle Murge, ma le rocce carbonatiche della piattaforma si rinvencono anche al di sotto della sequenza argillosa, di età plio – pleistocenica, del Tavoliere di Puglia. In corrispondenza del margine delle Murge, verso il Fiume Ofanto, questo assetto strutturale è determinato dalla presenza di un importante sistema di faglie dirette, orientate in direzione *antiappenninica* (SW – NE), che disloca la piattaforma a profondità crescenti dal bordo delle Murge verso le parti centrali del Tavoliere di Puglia.

Nelle parti della piattaforma appula sottostanti la sequenza argillosa plio-pleistocenica, la sommità della successione carbonatica può essere in alcuni punti rappresentata da rocce dei periodi compresi tra il Cretaceo e il Miocene; per tale motivo, le parti della piattaforma appula ribassate per faglia sono indicate con il termine più generale di *substrato carbonatico prepliocenico*.

La successione carbonatica affiorante nell'area nord – occidentale delle Murge è rappresentata da un'alternanza di rocce calcaree, calcareo dolomitiche e dolomie, a grana molto fine, assai compatte, generalmente stratificate e molto fratturate, di età Cretaceo inferiore (unità del "calcare di Bari").

Dal punto di vista genetico, la successione della piattaforma appula è costituita da rocce formatesi in ambienti di sedimentazione carbonatica (intra-bacinale), depositatesi in un intervallo di tempo lunghissimo, compreso tra il Triassico e il Miocene, includente ripetute fasi di sedimentazione, intervallate da più o meno ampie lacune stratigrafiche.

Le rocce calcaree sono costituite quasi esclusivamente da *calcite* (fase mineralogica del carbonato di calcio, CaCO_3); i termini dolomitici sono costituiti invece da calciti magnesiache, $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$, mentre nella dolomia è presente, in prevalenza, la *dolomite*, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

In conseguenza della composizione chimica e mineralogica, le rocce calcareo – dolomitiche sono soggette al fenomeno della dissoluzione chimica da parte delle acque d'infiltrazione meteorica (carsismo). Il fenomeno, prodotto dalla presenza d'anidride carbonica disciolta nell'acqua, determina la relativamente rapida dissoluzione della calcite (e in minor misura delle calciti

magnesiache e della dolomite) e la formazione nel sottosuolo di cavità e condotti carsici di diversa forma e dimensione.

Il risultato della dissoluzione delle rocce calcaree e dolomitiche è rappresentato anche da depositi di "*terra rossa*", materiale della granulometria delle argille, costituito da ossidi d'alluminio e di ferro, minerali argillosi (caolinite e illite), minori quantità di quarzo, feldspati e altri minerali accessori. Questi materiali, che si accumulano in superficie in depressioni morfologiche dette *doline* oppure nel sottosuolo all'interno di cavità, rappresentano il residuo "insolubile", derivante dalla dissoluzione di grandi volumi di roccia calcarea.

Il corso del Torrente Locone segna in modo netto il passaggio tra le rocce calcaree del rilievo delle Murge e la successione argillosa che costituisce il sottosuolo del Tavoliere di Puglia.

La sequenza riferita all'unità delle "*argille subappennine* (anche dette *argille grigio – azzurre*) è in realtà costituita, nonostante il nome, quasi ovunque da sedimenti con granulometria dei limi argilloso – sabbiosi.

All'interno dell'unità, che nelle parti interne del Tavoliere di Puglia raggiunge migliaia di metri di spessore, sono presenti livelli di sabbie argillose a grana fine, e talvolta di ghiaie. Questi livelli di materiali a grana più grossa sono interpretati come episodi di sedimentazione torbidity, verificatisi nel corso della sedimentazione in mare aperto dei materiali fini provenienti dall'erosione del fronte della catena appenninica in accrescimento, nel corso del Plio – Pleistocene. La successione argillosa plio – pleistocenica rappresenta il riempimento della fossa tettonica (*avanfossa*), individuata tra il fronte della catena appenninica e la piattaforma appula (*avampaese*).

La fase più recente dell'evoluzione geologica del Tavoliere di Puglia è consistita nella deposizione di sedimenti marini e alluvionali, nel periodo tra il Pleistocene superiore e l'Olocene.

Tali sedimenti, costituiti da sabbie, limi e ghiaie, originano superfici pianeggianti, poste a quote differenti ("terrazzi") che ricoprono con buona continuità le argille subappennine nell'area del Tavoliere di Puglia, e rappresentano i termini di chiusura della successione stratigrafica.

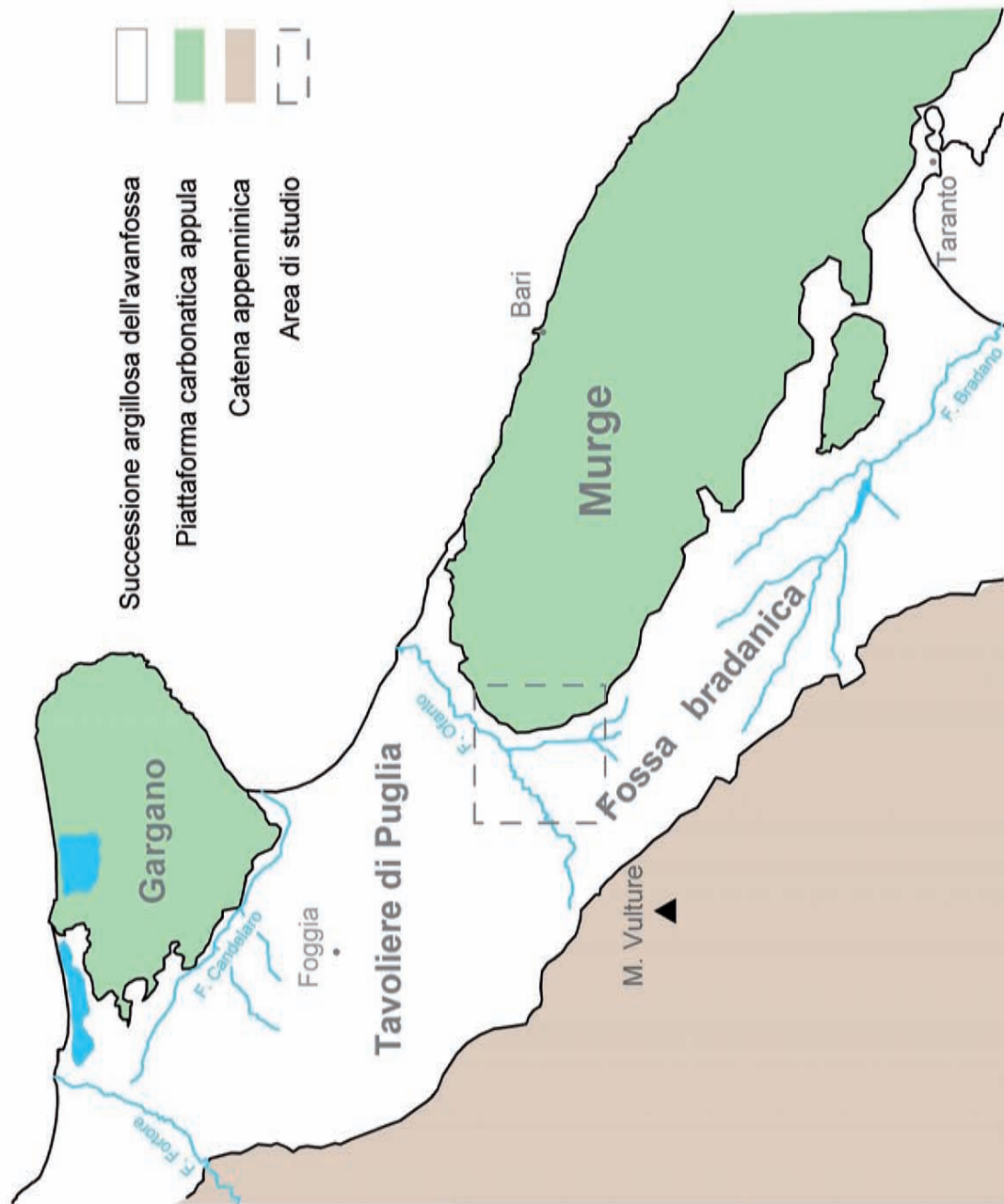


Figura 3 – Schema geologico regionale

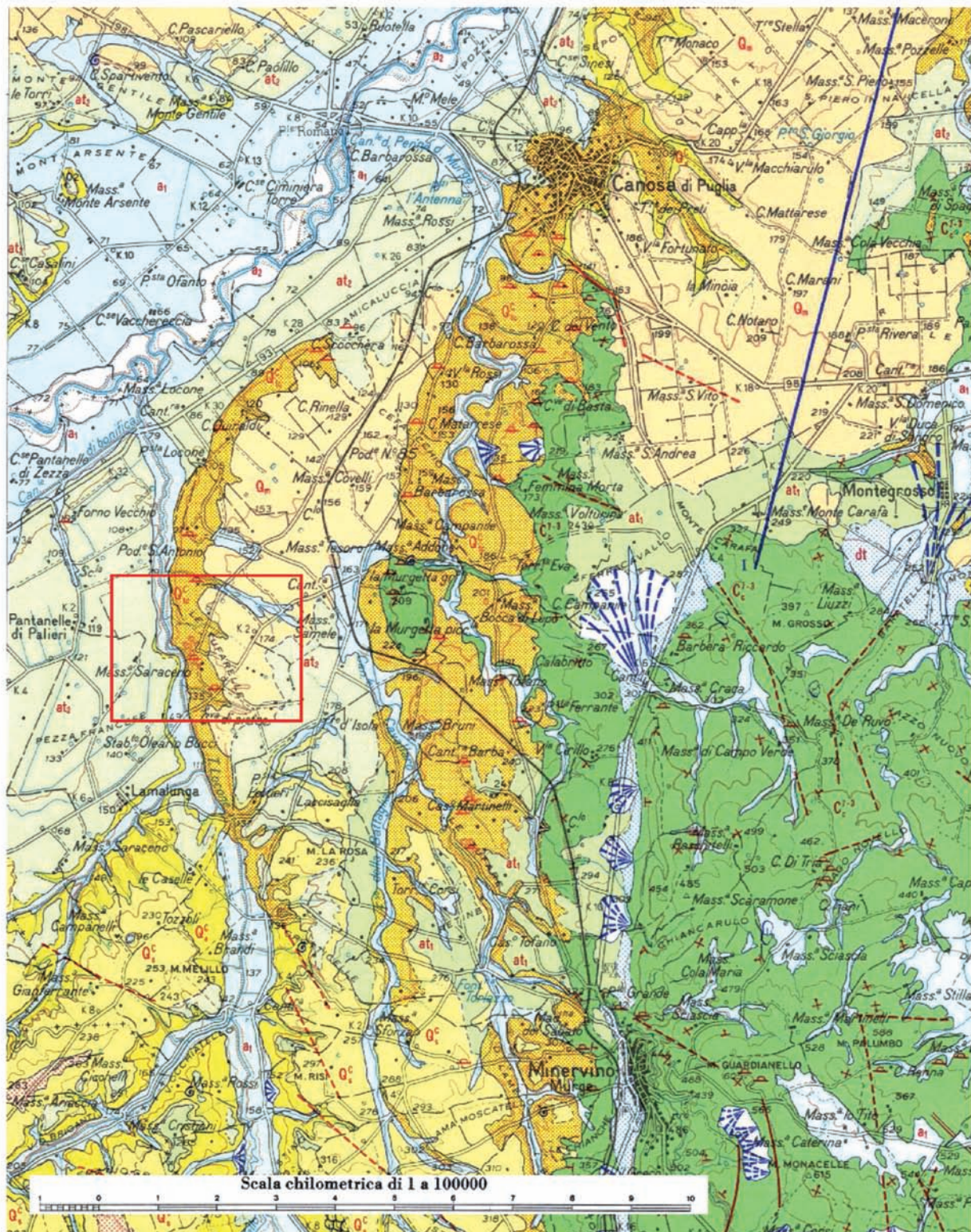




Figura 4 – Carta geologica dell'area tra Canosa di Puglia e Minervino Murge (stralcio della carta geologica d'Italia, scala 1:100.000, Foglio 176 - Barletta).

Foglio originale consultabile all'indirizzo:

http://www.apat.gov.it/Media/carta_geologica_italia/tavoletta.asp?foglio=176



Le acque sotterranee della zona possono essere presenti in differenti unità acquifere, in riferimento alla situazione stratigrafica e strutturale delle diverse parti del territorio.

a) acquifero della successione carbonatica delle Murge

Le successioni carbonatiche delle Murge costituiscono un serbatoio idrico sotterraneo di notevoli dimensioni, alimentato dalle precipitazioni ricadenti su tutto il territorio dell'altopiano dove, soprattutto nei territori delle Murge Alte, la presenza di forme carsiche consente la facile infiltrazione dell'acqua di pioggia nel sottosuolo.

L'acquifero delle Murge può complessivamente essere suddiviso in un settore corrispondente al versante delle Murge che digrada a NE verso il Mare Adriatico (settore esterno o "adriatico"), e uno corrispondente al versante che si affaccia a SW, in direzione della valle del Fiume Bradano (settore interno o "bradanico").

I due settori sono distinti da uno spartiacque idrogeologico ("profondo"), coincidente con la linea dello spartiacque idrografico (o "superficiale"), che si sviluppa in direzione *appenninica*, parallelamente alla costa adriatica e alla direzione di allungamento del rilievo delle Murge (NW – SE).

L'estensione del settore adriatico è maggiore se confrontata con quella del settore bradanico, a causa della posizione arretrata della linea spartiacque, spostata verso sud rispetto alla linea mediana del rilievo delle Murge.

Nel versante adriatico, le acque sotterranee fluiscono in direzione della linea di costa, dove scaturiscono in corrispondenza di sorgenti costiere o direttamente in mare, in un tratto della costa compreso tra Barletta e Brindisi.

Nel settore bradanico delle Murge, la direzione di flusso e il recapito finale delle acque sotterranee non sono così facilmente riconoscibili. Le acque di precipitazione che s'infiltrano nel sottosuolo dei territori carsici delle zone più interne delle Murge hanno come unico possibile recapito il tratto di costa ionica situato immediatamente ad ovest di Taranto, dove sono presenti le sorgenti del Tara, caratterizzate da una portata complessiva compresa tra 2 m³/s e 4 m³/s.

Nel settore di acquifero considerato, le acque sotterranee fluiscono quindi in direzione del Mare Ionio, parallelamente al versante bradanico delle Murge. Misure piezometriche, eseguite nell'ambito del presente studio nella zona di Tufarelle, indicano appunto una direzione di movimento dell'acqua di falda in direzione SE (cfr. §. 4).

b) acquifero del substrato carbonatico pre-pliocenico

Nelle aree adiacenti le zone interne delle Murge, al passaggio con l'avanfossa appenninica, la successione calcareo – dolomitica risulta interessata, come già descritto al §. 2, da faglie dirette che dislocano in profondità la piattaforma carbonatica appula, al di sotto della successione delle argille subappennine. Lo spessore dei terreni argillosi e, in modo corrispondente, la profondità del substrato carbonatico aumentano in direzione del Fiume Ofanto e del fronte della catena appenninica.

Le parti della successione carbonatica, ribassate al di sotto delle argille subappennine, ospitano anch'esse una falda idrica sotterranea, in continuità idraulica con l'acquifero presente nella parte della piattaforma appula affiorante nelle Murge.

In adiacenza all'area di Tufarelle, l'acquifero del substrato carbonatico è presente in sinistra del Torrente Locone. La profondità dell'acquifero del substrato in questa zona è di circa 100 – 200 metri, ma la profondità della successione carbonatica, al di sotto dei terreni argillosi, aumenta rapidamente in corrispondenza del fiume Ofanto e oltre, verso l'abitato di Cerignola.

La circolazione idrica nell'acquifero del substrato prepliocenico è complessivamente poco nota. Le porzioni ribassate per faglia dell'acquifero carbonatico sono interessate dalla presenza, in molti casi, di acque con caratteristiche particolari, tra le quali il contenuto salino relativamente elevato e la presenza di solfuro d'idrogeno disciolto. Tali caratteristiche possono essere messe in relazione alla presenza di acque "di formazione", associate a manifestazioni di idrocarburi nelle parti più profonde del substrato dell'avanfossa appenninica.

c) acquifero superficiale dei depositi alluvionali e marini terrazzati

L'acquifero superficiale è presente nelle zone dove i depositi sabbiosi e

ghiaiosi di età quaternaria, permeabili, sono sovrapposti alle argille grigio – azzurre, impermeabili. Tale condizione si verifica nella parte occidentale dell'area studiata, in sinistra del Torrente Locone e in corrispondenza del Fiume Ofanto.

Il termine superficiale per questo acquifero si riferisce al fatto che l'acqua di falda si può rinvenire già a piccola profondità dal piano campagna, da pochi metri ad alcune decine di metri al massimo. L'acquifero può essere costituito dalle alluvioni attuali, recenti e terrazzate dei corsi d'acqua, dai depositi marini della parte regressiva del ciclo di sedimentazione dell'avanfossa appenninica (sabbie di Monte Marano, conglomerato di Irsina), oppure dai depositi ingressivi del ciclo dei Depositi Marini Terrazzati.

Dove i depositi sono costituiti dalle alluvioni attuali e recenti dei corsi d'acqua, oppure dalle alluvioni terrazzate in continuità fisica con le alluvioni attuali e recenti, la falda si può definire di subalvea, in continuità idraulica con il corso d'acqua.

La presenza alla base dell'unità impermeabile (argille subappennine) è una condizione necessaria per l'accumulo dell'acqua di infiltrazione meteorica nei depositi sabbioso – ghiaiosi, e quindi per esistenza stessa della falda superficiale. Nelle zone dove i depositi sabbioso – ghiaiosi sono sovrapposti direttamente alle calcareniti o alle rocce calcareo – dolomitiche delle Murge, non vi è la presenza della falda superficiale.

3. Il sottosuolo di contrada Tufarelle

Le specifiche condizioni geologiche e idrogeologiche del sottosuolo, nell'area del comprensorio di cave in contrada Tufarelle, sono ben note grazie a informazioni dirette ottenute nel corso di perforazioni eseguite nel 2004 per la costruzione di pozzi per il monitoraggio della falda idrica (pozzi PZ1, PZ2 e PZ3), in prossimità dell'impianto della Bleu S.r.l.

Le perforazioni, della profondità compresa tra 140 m e 160 m, distano tra loro circa 200 metri (**figura 5**). Un quadro d'insieme delle caratteristiche delle

perforazioni è riportato nella **tabella 10**, al §. 6.

Le perforazioni hanno attraversato una successione, dello spessore compreso tra 80 e 85 metri, di tufo calcareo di colore bianco – giallastro, riferibile alla unità litostratigrafica della "Calcarenite di Gravina", di età Plio – Pleistocene. Si tratta di una roccia definita "tenera", poiché contraddistinta da una resistenza meccanica, alla scala del campione, relativamente minore rispetto ad altre rocce, a grana media e fine, porosa, massiva (non stratificata) e poco o nulla fratturata. Le caratteristiche del tufo calcareo sono peraltro bene osservabili in corrispondenza delle pareti delle numerose cave della zona.

Al di sotto della calcarenite, sono state rinvenute nel corso delle perforazioni, rocce riferibili all'unità del "Calcare di Bari", di età Cretaceo inferiore. Tale unità, dello spessore complessivo nel sottosuolo di migliaia di metri, è costituita da un'alternanza di rocce calcaree e dolomitiche, a grana fine, ben cementate e assai compatte.

Il passaggio dalla calcarenite alle sottostanti rocce calcareo – dolomitiche avviene attraverso un intervallo dello spessore di alcuni metri di breccia ad elementi calcarei, in matrice tufacea.

Il grado di fessurazione delle rocce calcareo – dolomitiche è piuttosto elevato, soprattutto in corrispondenza dei livelli idrici, rinvenuti nelle tre perforazioni a partire da una profondità corrispondente a una quota sul livello del mare di 30 metri.

In corrispondenza della profondità di rinvenimento dei livelli idrici non si è manifestata alcuna risalita di acqua nelle perforazioni, ad indicazione che la falda è localmente non confinata da strati impermeabili (*falda libera*).

All'interno della successione calcareo – dolomitica è stata riscontrata la presenza di cavità carsiche di dimensioni decimetriche e, in maggiore misura in corrispondenza del pozzo PZ1, di livelli di "terra rossa".

Sulla base dei dati delle perforazioni è stata disegnata la sezione geologica di **figura 6**. A partire dalla superficie originaria del piano campagna, la *zona insatura* del sottosuolo è quindi costituita da uno spessore di 80 – 85 metri di "tufo calcareo", permeabile per porosità, e da alcune decine di metri di roc-





Figura 5 – Ubicazione dei pozzi di monitoraggio a



della falda PZ1 ,PZ2 e PZ3, realizzati dalla Bleu S.r.L.

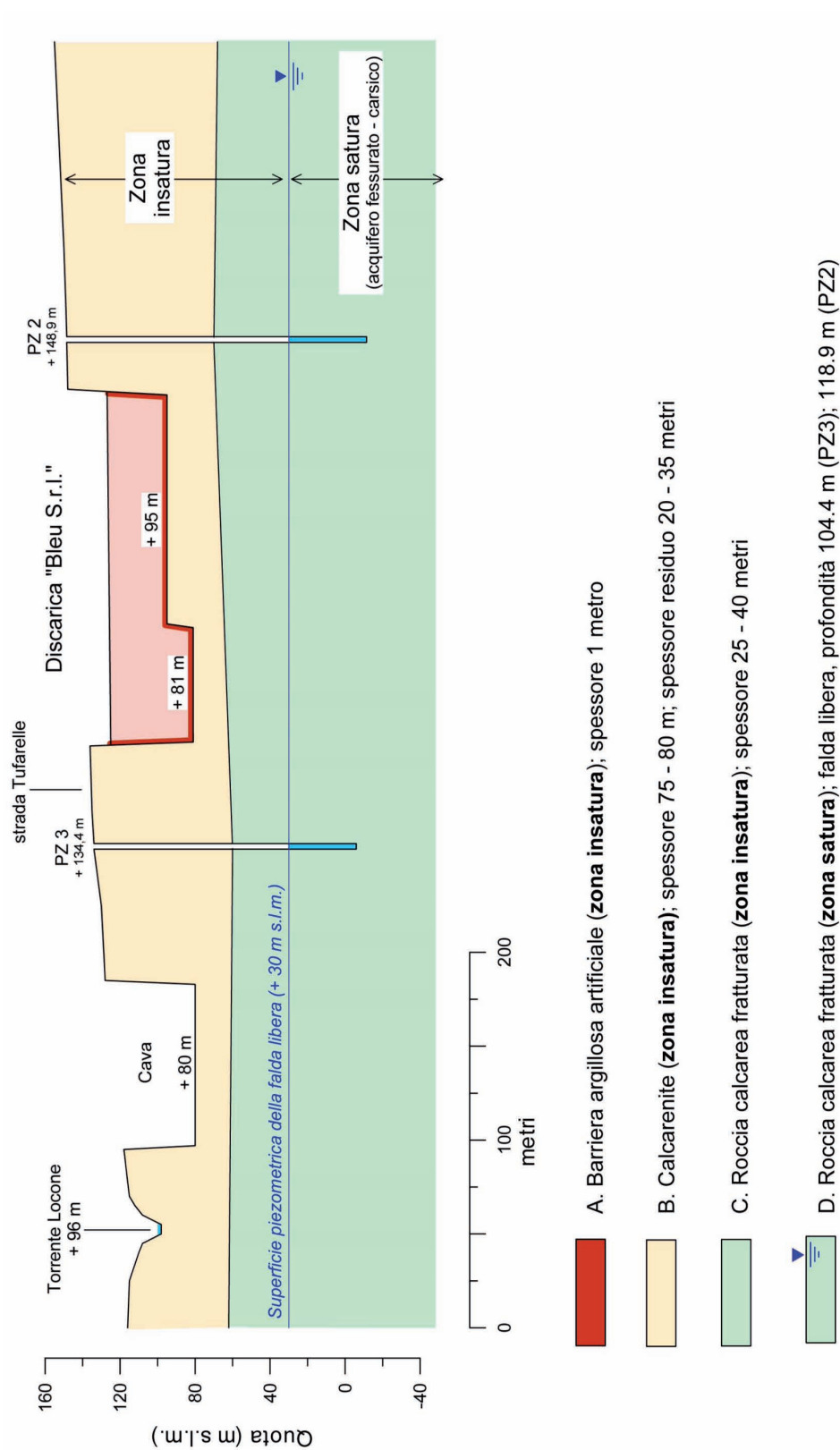


Figura 6 – Caratteristiche del sottosuolo in corrispondenza della Bleu S.r.l.

cia calcareo – dolomitica, permeabile per fessurazione e carsismo. Lo spessore minimo della zona insatura al di sotto del fondo della discarica Bleu S.r.l. è di circa 50 metri.

Le oscillazioni verticali della superficie piezometrica della falda, nel corso del tempo, sono relativamente contenute. Misure di livello piezometrico, effettuate nell'intervallo tra il 2004 e il 2009 in corrispondenza dei pozzi PZ1 e PZ2, hanno mostrato variazioni del livello della falda inferiori a 2 metri.

A partire dalla profondità di rinvenimento della falda, le perforazioni hanno attraversato la *zona satura* per uno spessore di circa 40 metri; i livelli rocciosi maggiormente fratturati, acquiferi, sono intervallati da livelli relativamente poco fratturati, meno permeabili (*acquitardi*). I livelli acquiferi attraversati dalle perforazioni si possono tuttavia considerare interconnessi, costituenti un unico sistema idrico sotterraneo.

Le caratteristiche geologiche e idrogeologiche ottenute dalla perforazione dei pozzi PZ1, PZ2 e PZ3, in prossimità dell'impianto della Bleu S.r.l., possono essere considerate rappresentative delle condizioni del sottosuolo dell'intera area della contrada Tufarelle, con limitate variazioni degli spessori e delle caratteristiche delle unità litostratigrafiche presenti.

In adiacenza alla contrada Tufarelle, verso ovest, il Torrente Locone separa l'area dove le rocce carbonatiche sono in affioramento, dalla zona dove la successione carbonatica è dislocata in profondità da faglie, al di sotto della successione argillosa. In questo senso il corso del torrente distingue in modo netto la zona di affioramento delle formazioni carbonatiche delle Murge, alla quale la contrada Tufarelle appartiene, dalla zona dei terreni clastici del Tavoliere di Puglia.

4. Direzione di flusso delle acque sotterranee

La direzione di movimento delle acque di falda nel sottosuolo di contrada Tufarelle è stata oggetto di più determinazioni, ripetute in modo da ottenere risultati significativi e privi di incertezza. Come già le prime misurazioni hanno

mostrato, l'area è caratterizzata da valori particolarmente bassi del gradiente idraulico, condizione che rende piuttosto delicato riuscire ad apprezzare le differenze di carico piezometrico, tra punti distanti anche molte centinaia di metri.

Nella zona satura del sottosuolo, l'acqua si muove da zone caratterizzate da un carico idraulico maggiore, verso zone con un carico idraulico più basso.

La determinazione della direzione di movimento della falda si può effettuare individuando la direzione del vettore *gradiente del carico idraulico* della falda, nel piano di coordinate (x, y):

$$\mathbf{grad} h = - \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \right)$$

Nella zona satura del sottosuolo, la componente del movimento dell'acqua lungo la direzione verticale (z) è ritenuta in genere trascurabile rispetto a quella orizzontale (ipotesi di Dupuit).

Il carico idraulico della falda è dato dall'altezza del livello piezometrico (la quota dove si stabilizza il livello idrico all'interno di un pozzo), rispetto a una superficie orizzontale di riferimento (di solito il livello del mare):

$$h = f(x, y)$$

Nella pratica, la direzione di flusso viene individuata determinando il carico idraulico in diversi punti della falda, come ad esempio in corrispondenza di pozzi per acqua nei quali sia possibile eseguire la misura della profondità del livello idrico, rispetto ad un punto di riferimento in superficie.

I valori del carico idraulico (h) vengono ottenuti sottraendo la profondità del livello idrico misurato (p) dal valore della quota topografica del punto di riferimento (z):

$$h = z - p$$

Le misure nei diversi punti devono essere effettuate più o meno simultaneamente, o in un arco di tempo limitato, a causa della possibile fluttuazione della superficie piezometrica della falda. La falda deve essere inoltre in quiete,

cioè in assenza di prelievi, sia in corrispondenza dei punti di misura che nei punti vicini.

La misura della profondità del livello può essere effettuata direttamente mediante un sondino piezometrico, con cavo graduato in centimetri e segnalatore elettrico del livello. Con tale dispositivo, la misura del livello piezometrico può essere effettuata con una precisione in genere di pochi centimetri. Per raggiungere tale livello di precisione è tuttavia necessario che il cavo del sondino scenda verticalmente nel pozzo, senza alcuna deviazione o attorcigliamento del cavo, inconvenienti che portano a una sovrastima della profondità del livello misurato. Misure accurate del livello piezometrico sono in pratica realizzabili solo in pozzi liberi, privi dell'impianto di sollevamento. L'ostruzione dovuta alla presenza dell'impianto di sollevamento rende peraltro in molti casi impossibile la misura, oltre a poterne falsare, come già detto, il valore.

La quota del punto di riferimento in corrispondenza della bocca del pozzo può essere determinata direttamente mediante rilievo topografico, oppure indirettamente, dopo il posizionamento planimetrico del punto su carta topografica di dettaglio, a curve di livello.

Un rilievo piezometrico per la determinazione della direzione di flusso della falda era stato già effettuato nella primavera 2004; di fatto erano stati realizzati due rilievi a breve distanza di tempo, prima e dopo la rimozione dell'impianto di sollevamento dal pozzo Di Muro G. (**tabelle 2 e 3**).

Le quote di riferimento per ciascun pozzo erano state determinate mediante rilievo topografico, utilizzando la metodologia GPS differenziale. La precisione delle misure di quota topografica effettuate con questo metodo può essere considerata inferiore a 0,01 metri.

	E	N	z (m s.l.m.)	p (m)	h (m s.l.m.)
PZ 1	2603293	4555727	135,89	105,82	30,07
PZ 2	2603399	4555911	148,94	118,87	30,07
PZ 3	2603140	4555860	134,35	104,31	30,04
P7 (Bleu)	2603275	4555777	135,99	105,91	30,08
P5 (Di Muro G.)	2603412	4555279	135,01	105,05	29,96

Tabella 2 – Rilievo piezometrico del 30 marzo 2004

	E (m)	N (m)	z (m s.l.m.)	p (m)	h (m s.l.m.)
PZ 2	2603399	4555911	148,94	118,88	30,06
PZ 3	2603140	4555860	134,35	104,27	30,08
P5 (Di Muro G.)	2603412	4555279	135,01	105,03	29,98

Tabella 3 – Rilievo piezometrico del 5 aprile 2004 (pozzo Di Muro G.)

I risultati mostrano l'esistenza di una diminuzione del carico idraulico da nord verso sud, con differenze dei valori di appena una decina di centimetri, nonostante la distanza di oltre 640 metri tra i pozzi PZ3 e il pozzo Di Muro G.

Per convalidare il risultato ottenuto, un nuovo rilievo piezometrico è stato effettuato nel marzo 2007, individuando pozzi situati a distanza reciproca più elevata, in modo da determinare più significative differenze del carico idraulico, tra i punti di misura (**tabella 4**). La distanza è di oltre 2850 metri tra il pozzo Lenoci e il pozzo Candela. La quota dei punti di riferimento è stata ricavata dalla carta topografica in scala 1:5000 (Carta Tecnica Regionale, elementi 435042 e 435081). L'accuratezza nella determinazione delle quote di riferimento può essere considerata pari a 0,1 metri.

	E (m)	N (m)	z (m s.l.m.)	p (m)	h (m s.l.m.)
Lenoci	2603308	4557243	143,5	111,23	32,3
PZ 2	2603399	4555911	148,8	116,98	31,8
Candela	2603115	4554391	112,4	81,02	31,4

Tabella 4 – Rilievo piezometrico del 2 marzo 2007

Le misure forniscono in questo caso differenze del carico idraulico pari a 0,9 metri, con un gradiente idraulico di circa 0,3 per mille (**figura 7**). La determinazione confermava l'esistenza di una componente in direzione sud del vettore gradiente idraulico, sebbene la posizione allineata dei pozzi costituiva ancora una volta una limitazione nell'individuare l'effettiva direzione del flusso idrico nel piano orizzontale.

L'opportunità di raggiungere un risultato assai più generale si è presentata nel maggio 2009, quando è stato possibile eseguire le misure su un numero più elevato di pozzi, distribuiti in modo più ampio sul territorio (**figura 8**). I dati del rilievo sono riportati nella **tabella 5**.

	E (m)	N (m)	z (m s.l.m.)	p (m)	h (m s.l.m.)
Lenoci (LEN)	2603308	4557243	143,5	109,43	34,1
PZ 2	2603399	4555911	148,8	115,23	33,6
Candela (CAN)	2603115	4554391	112,4	79,22	33,2
Ferrara nuovo (FN)	2603332	4559148	110,0	75,16	34,8
P99	2606682	4558956	155,3	122,47	32,8
Valle vecchia (VAV)	2604104	4558202	150,5	116,74	33,6

Tabella 5 – Rilievo piezometrico del 14 maggio 2009

Le linee di uguale carico idraulico (isopieze, m s.l.m.), ottenute per interpolazione dei dati rilevati, mostrano che il carico idraulico della falda diminuisce con regolarità in direzione SE, con un gradiente medio pari a 0,7 per mille (0,7 m/km). Le misure indicano quindi l'esistenza, nel settore dell'acquifero considerato, di una direzione di movimento delle acque sotterranee verso SE. La direzione di flusso ottenuta è compatibile con la collocazione idrogeologica dell'area, che si situa sul versante "bradanico" delle Murge (cfr. §. 2).

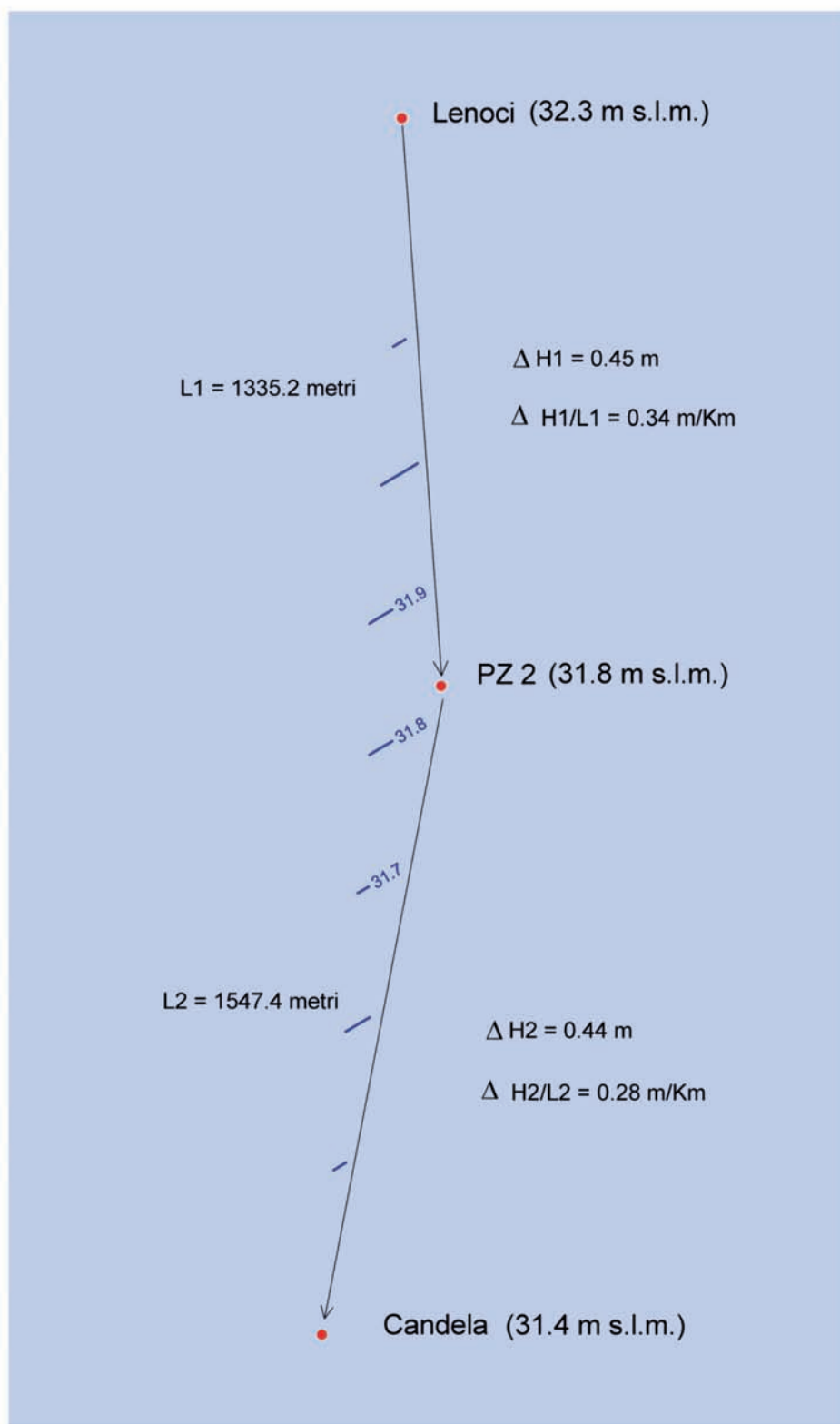


Figura 7 – Dati del rilievo piezometrico effettuato il 2 marzo 2007





Figura 8 – Distribuzione del carico idraulico della falda

relle (Canosa di Puglia - Minervino Murge)



da (m s.l.m.) ottenuta dal rilievo del 14 maggio 2009

isica, Università degli Studi di Bari
nciano (CH)

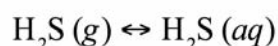
5. Composizione geochimica delle acque di falda

L'acqua di falda in contrada Tufarelle possiede caratteristiche particolari, se confrontate con quelle delle acque contenute in altre porzioni dell'acquifero carbonatico delle Murge. La conducibilità elettrica, proporzionale alla quantità totale di ioni disciolti nell'acqua, è generalmente intorno al valore di 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valore che può essere considerato circa doppio rispetto al valore proprio delle acque sotterranee nelle zone interne delle Murge.

Il valore del potenziale di ossido – riduzione (ORP) è generalmente negativo, con valori fino a -280 mV. Le proprietà fortemente riducenti dell'acqua di falda si associano alla presenza di *solfuro di idrogeno* disciolto, nettamente rilevabile dall'odore sulfureo dell'acqua estratta dai pozzi.

La presenza di solfuro di idrogeno è una caratteristica di tutti i pozzi in contrada Tufarelle, ma è ancor più nettamente rilevabile nei pozzi situati in sinistra del Fiume Ofanto, che intercettano l'acquifero carbonatico della piattaforma apula, ribassato per faglia, al di sotto di rilevanti spessori di argilla plio-pleistocenica.

Il solfuro di idrogeno (detto anche *idrogeno solforato* oppure *acido solfidrico*) è un gas abbastanza solubile in acqua (più solubile dell'ossigeno e dell'anidride carbonica). La reazione di dissoluzione del gas in acqua può essere scritta come:

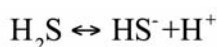


La costante di equilibrio del processo di dissoluzione è:

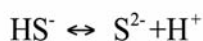
$$K_H = \frac{C_{\text{H}_2\text{S}}}{P_{\text{H}_2\text{S}}} = 9,8 \times 10^{-2}$$

Poiché la pressione parziale del gas nell'aria ($P_{\text{H}_2\text{S}}$) è zero, la concentrazione di equilibrio del gas nell'acqua ($C_{\text{H}_2\text{S}}$) è anch'essa uguale a zero: il gas tende ad allontanarsi rapidamente dall'acqua nella quale è inizialmente disciolto.

Il solfuro di idrogeno si dissocia in acqua secondo le reazioni:



e



Le costanti di equilibrio a 25°C sono:

$$K_1 = \frac{[\text{HS}^-] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{S}]} = 10^{-7}$$

e

$$K_2 = \frac{[\text{S}^{2-}] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{HS}^-]} = 10^{-13}$$

L'equilibrio delle reazioni di dissociazione è controllato dal pH. Dal valore della prima costante di dissociazione si ottiene, per un valore di pH = 7:

$$[\text{H}_2\text{S}] = [\text{HS}^-]$$

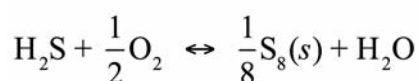
Solo una piccolissima frazione del solfuro totale disciolto in acqua è sotto forma di ione solfuro, come si ricava dal valore della seconda costante, in corrispondenza di pH = 7:

$$[\text{S}^{2-}] = 10^{-20} [\text{HS}^-]$$

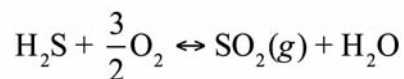
A pH < 7, prevale quindi la specie H₂S; dalla seconda costante si rileva che lo ione solfuro (S²⁻) è la specie prevalente in acqua per pH > 13.

L'acqua di falda di contrada Tufarelle ha valori di pH (al campionamento) intorno a 7, per cui il solfuro totale disciolto al momento del prelievo è rappresentato da concentrazioni circa uguali di HS⁻ (ione bisolfuro) e di H₂S non dissociato.

Il solfuro d'idrogeno è una sostanza riducente che viene facilmente ossidata dall'ossigeno dell'atmosfera. Nei campioni d'acqua lasciati a contatto con l'aria, si osserva dopo qualche tempo la comparsa di un'opalescenza di colore bianco, dovuta alla formazione di zolfo elementare, in sospensione colloidale:



L'ossidazione del solfuro può procedere con la formazione di anidride solforosa:



L'anidride solforosa produce il tipico odore di zolfo, che si sovrappone all'odore caratteristico del solfuro d'idrogeno, descritto come di "uova marce".

Le concentrazioni del solfuro totale disciolto in acqua sono state determinate in alcuni pozzi delle contrada Tufarelle e delle zone vicine. Le misure sono state effettuate in sito, con metodo potenziometrico (potenziometria diretta con elettrodo a membrana cristallina di Ag_2S), trattando i campioni immediatamente al momento del prelievo con una soluzione antiossidante (SAOB, *Sulphide Anti-Oxydant Buffer*), per limitare la reazione del solfuro con l'ossigeno atmosferico; la soluzione è anche fortemente alcalina, in modo da produrre la completa dissociazione del solfuro prima della misura.

Il metodo utilizzato è piuttosto agevole per la misura dello ione solfuro in sito, ma risente della difficoltà di calibrazione dell'elettrodo, per l'assenza di un idoneo standard di riferimento.

Il solfuro di sodio nonoidrato che si utilizza ha una formula stechiometrica non costante ed è fortemente reattivo con l'ossigeno e con l'umidità atmosferica.

Ciò nondimeno, l'incertezza delle misure effettuate con questo metodo può essere ritenuta inferiore alla variabilità delle concentrazioni che si determina a seguito delle operazioni di prelievo, trattandosi di un gas poco persistente in acqua. Se si assume costante la variabilità della concentrazione del gas a seguito del prelievo, il metodo utilizzato può quindi ritenersi idoneo al confronto delle concentrazioni relative nei campioni esaminati.

I valori di concentrazione di ione solfuro misurati sono riportati nella **tabella 6**. I valori determinati nei pozzi di contrada Tufarelle sono compresi tra circa 2,6 e 10 mg/L. Nel pozzo di tenuta Cefalicchio, situato a est di Tufarelle, verso le parti interne delle Murge, si registra una concentrazione molto più bassa (0,2 mg/L). I valori più elevati (fino a 22 mg/L) si registrano nei pozzi P018 e P006, si-

tuati in sinistra del Fiume Ofanto. Nel pozzo P020, situato anch'esso in sinistra del Fiume Ofanto, ma attestato nella falda superficiale, è stata misurata una concentrazione pari a zero.

I valori di concentrazione dello ione solfuro si correlano con i valori del potenziale di ossidoriduzione; alle concentrazioni maggiori si associano i valori di ORP più bassi.

I valori del potenziale di ossidoriduzione sono stati determinati con un elettrodo inerte di platino, in riferimento a un elettrodo Ag/AgCl, saturato con KCl. I valori più bassi (più negativi) del potenziale di ossidoriduzione indicano la maggiore tendenza delle specie presenti nell'acqua a cedere elettroni (cioè a ossidarsi) ad altre specie chimiche, che abbiano una non minore tendenza ad accettare elettroni, cioè a ridursi.

L'ambiente fortemente riducente delle acque di falda ha importanti conseguenze sulla mobilità geochemica di diversi ioni, quali ad esempio i metalli ferro (Fe) e manganese (Mn).

	T (°C)	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH (-)	Alk (meq/L)	ORP (mV)	S ²⁻ (mg/L)	Fe ²⁺ (mg/L)	Mn ²⁺ (mg/L)
PZ1	18,3	1018	7,11	7,44	-282,5	6,8	<0,05	<0,02
P7	18,4	984	7,12	7,54	-273,4	4,7	<0,05	<0,02
San Giorgio	18,7	968	7,20	7,26	-232,1	4,9	0,22	0,06
Di Stasi (2)	18,5	1009	7,33	7,88	-230,1	9,6	<0,05	<0,02
Leone S.	18,7	946	7,53	6,84	-188,6	2,6	0,10	<0,02
Lenoci	18,5	979	7,16	7,46	-275,2	4,8	0,08	<0,02
Ferrara vecchio	20,9	1059	6,92	7,46	-26,0	<0,05	N.D.	N.D.
Cefalicchio	18,9	1060	7,32	7,90	61,9	0,2	0,15	<0,02
P006	23,9	1303	7,08	9,00	-229,0	16,9	0,07	<0,02
P008	21,9	1650	7,23	11,80	-192,0	4,8	0,24	0,03
P018	20,4	1678	6,88	11,90	-285,2	21,9	<0,05	<0,02
P020	18,1	1424	7,34	6,28	68,2	<0,05	0,05	0,09
Poggiorsini	18,7	423	7,75	4,60	150,0	<0,05	<0,05	<0,02

Tabella 6 – Caratteristiche chimico – fisiche rilevate in sito

Questi elementi sono contenuti in minerali accessori delle rocce calcaree, come ad esempio la pirolusite (MnO₂), l'ematite (Fe₂O₃) e la magnetite (Fe₃O₄). In questi minerali, i metalli si trovano in uno stato di ossidazione elevato, e sono

insolubili. Nelle condizioni di potenziale di ossido – riduzione assai basso, evidenziate per le acque di falda in esame, si può verificare la riduzione del manganese e del ferro a uno stato di ossidazione quale Mn(II) e Fe(II), stato nel quale queste due specie costituiscono ioni *solubili* in acqua.

L'ambiente riducente dell'acqua di falda può determinare anche la riduzione dei composti di ferro che costituiscono la *ruggine*, che si forma per reazione tra le tubazioni in acciaio dei pozzi e l'acqua, con conseguente dissoluzione dello ione ferro in forma ridotta. Lo ione ferroso può inoltre reagire con lo ione solfuro, formando un precipitato insolubile di solfuro di ferro, di colore nero, che si rinviene generalmente nei pozzi all'inizio dei prelievi, soprattutto dopo un certo periodo d'inattività degli stessi.

L'azione riducente delle specie presenti nell'acqua di falda si rileva inoltre nei confronti dell'azoto inorganico. Risulta infatti che la concentrazione dello ione nitrato (azoto nitrico, stato di ossidazione +5) nei campioni esaminati è praticamente nulla, o assai bassa (**tabella 7**), tranne che per il campione P020, relativo alla falda superficiale. In altre zone dell'acquifero carbonatico delle Murge, valori di alcuni milligrammi per litro, fino ad alcune decine di milligrammi per litro (pozzo Poggiorsini), sono considerati normali e sono sempre presenti.

Nelle acque della contrada Tufarelle, e delle zone vicine studiate, l'azoto inorganico si trova, probabilmente, sottoforma di azoto molecolare disciolto (N₂, stato di ossidazione 0). L'azoto molecolare in profondità nelle acque di falda non è stato determinato; d'altronde, al momento del campionamento in superficie, l'azoto molecolare eventualmente presente si mescolerebbe con il gas di origine atmosferica, fornendo dati poco significativi.

Un'altra possibilità, dal punto di vista geochimico, è che l'azoto inorganico possa trovarsi nello stato più ridotto, sottoforma di azoto ammoniacale (stato di ossidazione -3). In corrispondenza dei valori di pH delle acque di falda (circa 7), si tratterebbe in questo caso dello ione ammonio. E' necessario tuttavia specificare che lo ione ammonio non è stato rilevato nei campioni esaminati. La possibilità dell'esistenza di azoto ammoniacale viene qui riferita in quanto tale specie è comunque compatibile con l'ambiente geochimico evidenziato, e

la sua presenza nelle acque di falda non può essere esclusa in altri punti del settore dell'acquifero in considerazione.

Al riguardo delle conseguenze della presenza del solfuro d'idrogeno nelle acque di falda è necessario segnalare infine la possibilità che questo composto possa determinare interferenze analitiche nella determinazione di altri costituenti.

Lo ione bisolfuro (una base forte) può contribuire al valore di alcalinità dell'acqua; tuttavia, le acque delle zone studiate posseggono di per sé un'alcalinità piuttosto elevata e, di conseguenza, questo contributo può ritenersi trascurabile per il calcolo della concentrazione di HCO_3^- .

La presenza del solfuro può determinare interferenza nella determinazione dell'ossidabilità al permanganato (ossidabilità Kubel). Tuttavia se il campione viene arieggiato prima della determinazione, non si dovrebbero ottenere significativi valori di ossidabilità riconducibili alla presenza del solfuro. Interferenza nella determinazione dell'ossidabilità potrebbe derivare anche dalla presenza dello ione ferroso in concentrazioni non trascurabili.

Problemi analitici possono evidenziarsi inoltre nella determinazione fotometrica dello ione ammonio, anche per concentrazioni di solfuro d'idrogeno assai basse. Misure effettuate con la reazione di Nessler, che avevano fornito concentrazioni di diversi mg/L, non sono state successivamente confermate da analisi ripetute sugli stessi campioni mediante cromatografia ionica, che ha fornito valori di concentrazione nulli per lo ione ammonio.

Come accennato all'inizio del paragrafo, le acque sotterranee di contrada Tufarelle sono contraddistinte da una conducibilità elettrica e da un contenuto salino maggiore rispetto alle adiacenti zone interne delle Murge.

La capacità di condurre la corrente elettrica è dovuta al contributo di tutti gli ioni disciolti, in proporzione alla loro concentrazione in acqua. I costituenti presenti in quantità maggiore (costituenti principali) sono gli ioni dei metalli alcalini (Na^+ e K^+) e alcalino-terrosi (Mg^{2+} e Ca^{2+}), lo ione cloruro (Cl^-), lo ione solfato (SO_4^{2-}) e lo ione bicarbonato (HCO_3^-).

Nel presente studio, i valori della concentrazione dei diversi costituenti prin-

cipali sono stati determinati mediante cromatografia ionica (ad eccezione dei valori di HCO_3^- , calcolati dai valori di alcalinità, ottenuta per titolazione con HCl). Mediante cromatografia ionica sono state anche determinate le concentrazioni di Li^+ , Sr^{2+} , F^- , Br^- , NO_3^- , contenuti in quantità assai minori.

Le concentrazioni dei costituenti principali nelle acque di contrada Tufarelle e delle zone vicine, espresse in mg/L (o *ppm*), sono riportate in **tabella 7**; a partire da questi dati sono stati costruiti i diagrammi di **figura 9** dove i valori di concentrazione sono riportati come percentuale dei milliequivalenti di anioni e cationi disciolti.

I dati evidenziano la prevalenza degli ioni calcio e bicarbonato. Le acque possono definirsi quindi *bicarbonato – calciche*, al pari delle acque di altre zone interne dell'acquifero carbonatico, seppure nel presente caso con un contenuto maggiore sia di questi ioni che degli ioni alcalini, di cloruro e di solfato. L'elevata concentrazione di questi ultimi ioni si riscontra in genere nelle zone costiere dell'acquifero carbonatico delle Murge, dove è presente il fenomeno dell'intrusione per via sotterranea dell'acqua marina. Tale fenomeno può essere escluso per la zona studiata, in riferimento alla situazione geologica e alla stessa collocazione geografica dell'area.

La concentrazione di ioni delle acque di falda in contrada Tufarelle può essere messa in relazione alla presenza di acqua con elevato contenuto salino nell'adiacente substrato carbonatico ribassato per faglia. In queste parti dell'acquifero, intercettato da un buon numero di pozzi nonostante la salinità dell'acqua non proprio idonea per l'uso in agricoltura, la circolazione idrica è poco conosciuta. L'acqua è caratterizzata da tempi di residenza nel sottosuolo assai più lunghi rispetto all'acquifero delle Murge; essa risulta in collegamento con le parti della piattaforma appula situate a profondità ancora maggiore, al di sotto dei terreni argillosi del Tavoliere di Puglia. In queste parti molto profonde del substrato, si rinvencono acque salate, o vere e proprie *brine* ipersaline, associate a manifestazioni di idrocarburi (acque di formazione o "connate").

I punti rappresentativi della composizione chimica delle acque di formazione presenti nel substrato dell'avanfossa appenninica sono riportati nella **figura 9**. I dati derivano dalle perforazioni relative alla ricerca petrolifera effet-

tuata nell'area della fossa bradanica, dal Molise fino al mare Ionio, pubblicati dall'Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse.

Nella **figura 10** (diagramma di Schoeller) è riportato il confronto della composizione dell'acqua di contrada Tufarelle con quella delle acque di formazione dei pozzi per la ricerca di idrocarburi (pozzi Lavello 1 e Lavello 2), situati sul fronte della catena appenninica dalla parte opposta dell'avanfossa, rispetto all'area studiata. Sono anche riportati i "tracciati" della composizione del mare Adriatico e dell'acquifero carbonatico non interessato dalla intrusione di acqua marina.

Le acque connate considerate sono caratterizzate da un minore contenuto degli ioni magnesio e solfato, rispetto all'acqua di mare.

La composizione dell'acqua di contrada Tufarelle può essere considerata come il risultato del mescolamento dell'acqua dell'acquifero carbonatico delle Murge con le acque connate associate agli idrocarburi presenti nelle parti profonde del substrato dell'avanfossa appenninica.

La presenza di fluidi di origine profonda spiega anche la presenza del solfuro di idrogeno nelle acque di falda in contrada Tufarelle e in tutta la zona studiata. Questo gas si incontra di frequente nel corso di perforazioni profonde per la ricerca di idrocarburi, ed è stato rilevato nei pozzi petroliferi di Lavello e delle vicine zone di Melfi e di Forenza.

L'ipotesi del mescolamento con acque di origine profonda è compatibile con la distribuzione del solfuro d'idrogeno nelle acque dell'acquifero carbonatico, dove si osserva un aumento della concentrazione in relazione alla distanza dal bordo delle Murge, con un incremento dalla zona di Tufarelle in direzione del Fiume Ofanto e oltre il fiume stesso (**figura 11**).

Evidenze di un apporto di acque di origine profonda nella falda idrica sotterranea della zona studiata sono fornite anche dalla distribuzione della concentrazione della silice (SiO_2), riportata nella già richiamata **tabella 7**, oltre che di alcuni costituenti quali, Sr^{2+} , Br^- , I^- (**tabella 8**). Questi costituenti presentano concentrazioni più elevate rispetto alle acque tipiche dell'acquifero delle Murge e mostrano ancora una volta un generale incremento nei pozzi che prelevano dalle parti più profonde del substrato carbonatico.

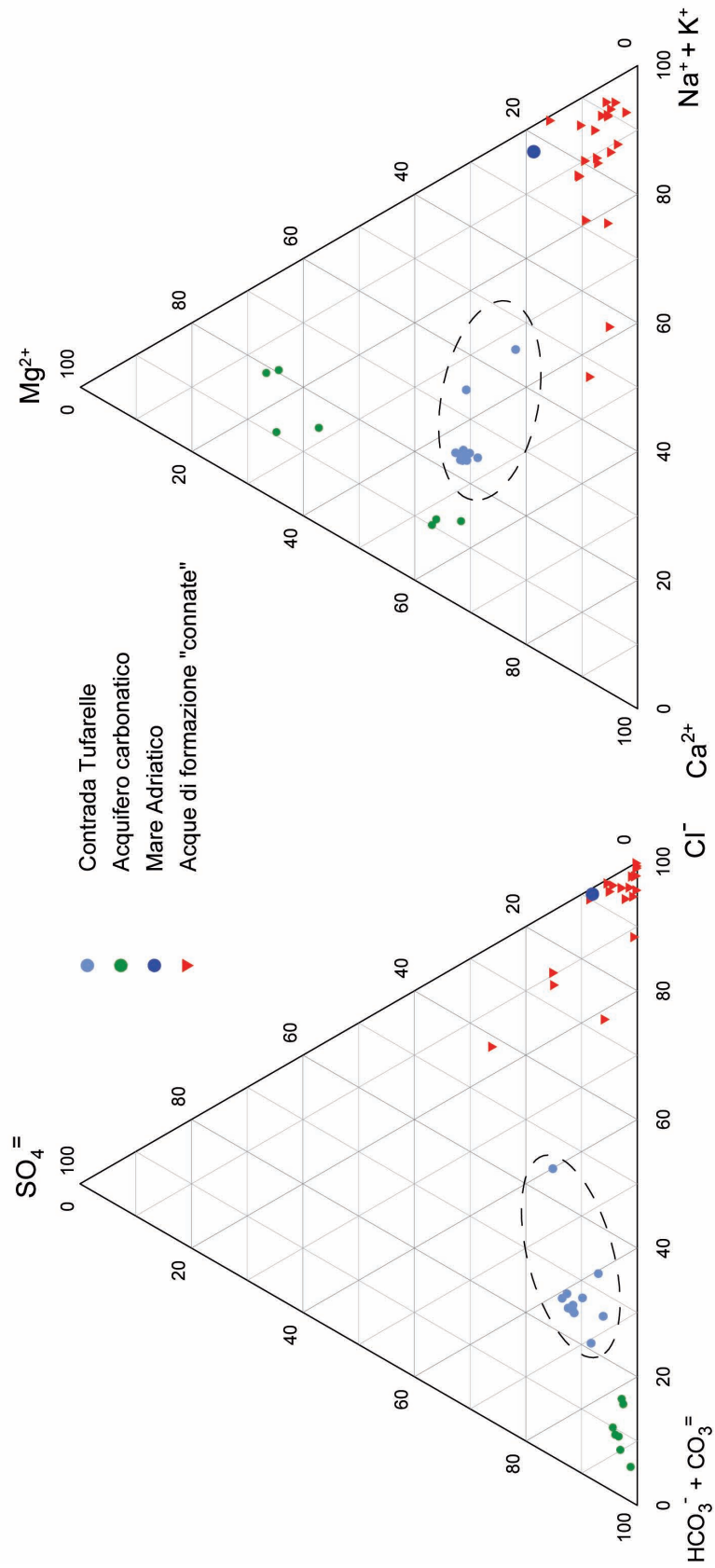


Figura 9 – Composizione percentuale di acqua di differente origine. Costituenti principali: a) anioni. b) cationi

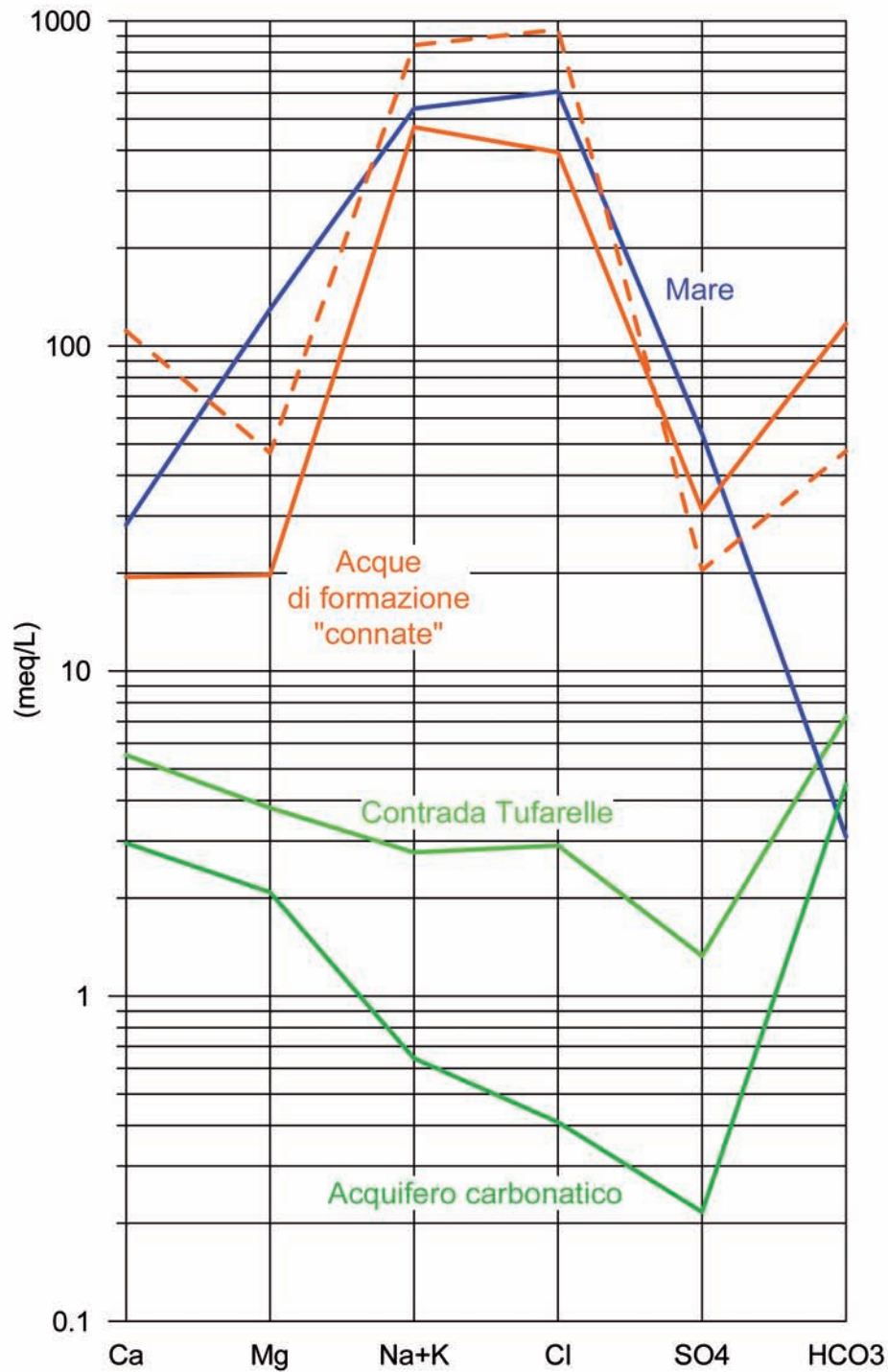


Figura 10 – Concentrazione dei costituenti principali (meq/L), nel diagramma di confronto di Schoeller

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃	HCO ₃ ⁻	SiO ₂
PZ1	60,5	6,5	44,7	110,9	99,3	62,8	0,2	439,2	19,5
P7	57,9	7,3	45,9	108,1	103,6	71,2	<0,1	459,9	29,3
San Giorgio	59,8	6,4	46,1	110,6	103,0	63,9	<0,1	442,9	29,4
Di Stasi	66,3	6,4	51,6	114,1	83,3	44,4	0,2	480,7	22,9
Leone	61,2	8,4	44,5	103,5	101,1	72,6	<0,1	417,2	28,1
Lenoci	60,3	7,4	44,3	105,6	101,5	65,2	<0,1	455,1	25,5
Ferrara	63,3	8,6	46,3	110,9	106,2	65,5	1,7	455,1	12,0
Cefalicchio	67,9	6,6	50,1	118,8	122,5	78,8	0,1	481,9	23,8
P006	77,7	7,0	52,9	130,7	138,8	67,6	<0,1	549,0	33,6
P008	145,8	15,9	73,7	138,5	163,5	51,4	<0,1	721,0	33,0
P018	109,5	7,3	70,0	187,4	227,3	66,1	<0,1	727,0	39,2
P020	162,2	24,0	45,5	113,6	248,8	114,1	55,8	383,1	39,2
Poggiorsini	13,2	2,7	25,4	59,3	14,5	10,4	27,2	273,3	13,3

Tabella 7 – Concentrazione dei costituenti principali (mg/L)

	Li	Sr ²⁺	F ⁻	Br ⁻	I ⁻ (x10 ⁻³)
PZ1	<0,01	0,42	0,79	0,92	<0,2
P7	<0,01	1,37	0,87	0,96	1,0
San Giorgio	0,03	1,85	0,87	0,89	2,6
Di Stasi	<0,01	1,12	0,78	0,62	3,5
Leone	0,15	1,93	0,85	0,89	1,9
Lenoci	0,07	0,78	0,79	0,83	2,1
Ferrara	<0,01	<0,20	0,89	0,92	1,1
Cefalicchio	<0,01	1,82	1,12	1,15	2,9
P006	0,06	2,80	1,20	1,47	2,1
P008	0,03	1,77	0,89	1,60	7,4
P018	0,11	2,56	0,94	2,60	4,1
P020	0,09	<0,20	2,01	0,73	-
Poggiorsini	<0,01	<0,20	0,35	0,03	<0,2

Tabella 8 – Concentrazione dei costituenti secondari (mg/L)

6. Il sistema di monitoraggio della falda idrica in contrada Tufarelle

Lo stato della falda idrica sotterranea in contrada Tufarelle è oggetto di accertamenti periodici da parte delle società che gestiscono gli impianti di smal-

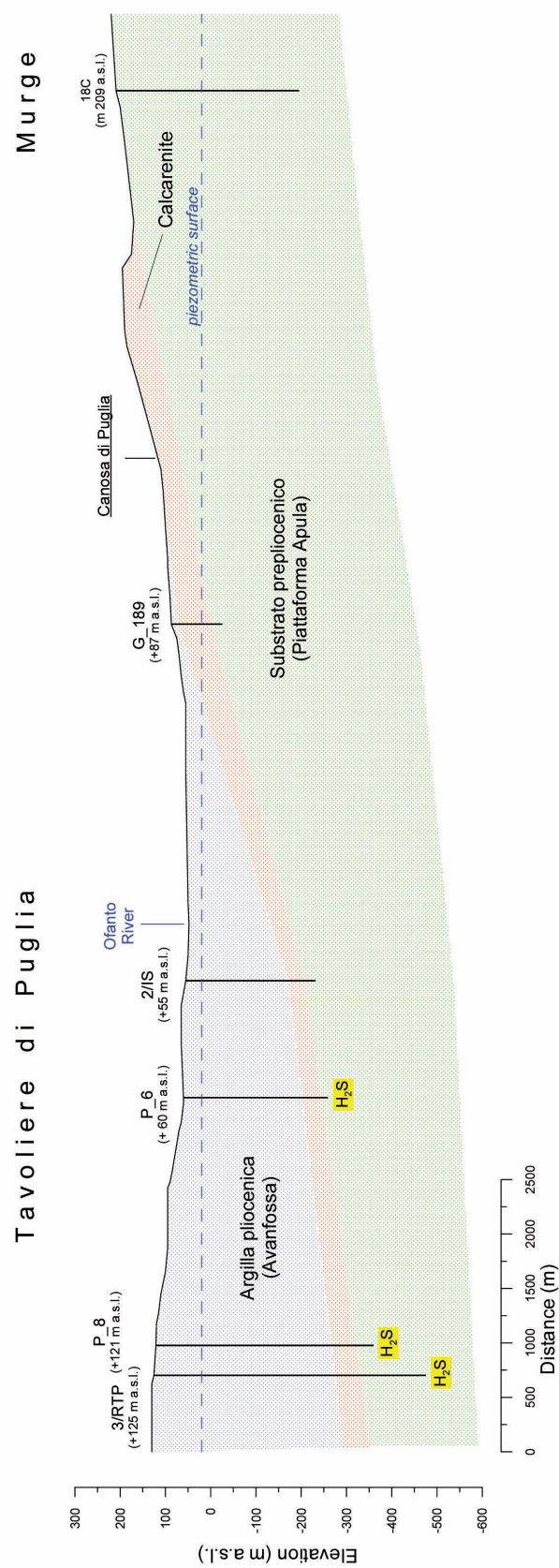


Figura 11 – Sezione geologica tra la piattaforma carbonica appula affiorante (Murge) e l’avanfossa appenninica (Tavoliere di Puglia)

timento e delle autorità delegate al controllo sanitario e ambientale, in riferimento a possibili condizioni d'inquinamento. Gli accertamenti avvengono attraverso l'effettuazione di un esame chimico e batteriologico di campioni d'acqua prelevati da pozzi situati in differenti punti del territorio, in riferimento alla posizione degli impianti e alle caratteristiche idrogeologiche dell'area.

Il sistema di monitoraggio della falda utilizzato dalla Bleu S.r.l. comprende sia pozzi appositamente realizzati per questo scopo (pozzi PZ1, PZ2, PZ3 e P7), che altri pozzi privati, normalmente destinati ad uso agricolo (pozzi Lenoci, Leone, San Giorgio, Di Stasi, Candela).

I pozzi PZ1, PZ2 e PZ3 sono stati progettati e costruiti nel 2004 per determinare le caratteristiche della falda nelle immediate vicinanze dell'impianto della Bleu S.r.l. I tre pozzi hanno caratteristiche costruttive assai simili (**tabella 9**).

La perforazione dei pozzi è stata effettuata con metodo a rotazione con distruzione di nucleo, utilizzando diametri decrescenti in funzione della profondità e delle caratteristiche litostratigrafiche del sottosuolo. Per isolare completamente la falda dalla superficie, le perforazioni sono state cementate nel tratto in corrispondenza del tufo calcareo, rivestito con tubazione chiusa in acciaio.

	PZ1	PZ2	PZ3
Quota punto di riferimento (m s.l.m.)	135,89	148,94	134,35
Profondità totale (m)	156	160	140
Perforazione D=445 mm (m)	0÷3	0÷3	0÷3
Perforazione D=350 mm (m)	3÷85	3÷80	3÷72
Perforazione D=254 mm (m)	85÷156	80÷160	72÷140
Rivestimento acciaio d=350 mm (m)	0÷3	0÷3	0÷3
Rivestimento acciaio d=273 mm (m)	0÷85	0÷80	0÷72
Rivestimento PVC d=200 mm (m)	0÷156	0÷160	0÷140
Tubo filtro (m)	105÷150	120÷125	105÷135
Profondità tetto calcare (m)	85	79	80
Profondità rinvenimento falda (m)	106	119	104
Volume interno acqua (m ³)	2,46	1,47	1,47
Profondità installazione pompa (m)	120	132	120
Portata di prelievo (l/s)	8,3	5,5	5,8

Tabella 9 – Caratteristiche costruttive dei pozzi di monitoraggio

Le perforazioni, della profondità compresa tra 140 e 160 metri, sono rivestite per tutta la lunghezza con tubazione in materiale plastico inalterabile (PVC), aperta in corrispondenza del tratto acquifero (**figura 12**).

I pozzi sono attrezzati con impianto di sollevamento costituito da elettropompa sommersa e tubazione di mandata in acciaio zincato, con contatore del volume dell'acqua estratta. Essi risultano idonei al prelievo di campioni rappresentativi delle caratteristiche delle acque di falda nella zona di acquifero in corrispondenza della discarica della Bleu S.r.l. e nelle parti immediatamente circostanti.

Durante il campionamento, l'acqua affluisce verso il punto di prelievo dalla parte di acquifero circostante il pozzo, all'interno del *raggio d'influenza* del pozzo stesso ("moto forzato" dell'acqua). I pozzi sono quindi in grado di intercettare e segnalare tempestivamente la presenza di eventuali inquinanti provenienti dalla discarica (**figura 13**). Questi pozzi, al pari del pozzo P7 utilizzato anche come pozzo di servizio per l'impianto, svolgono quindi un ruolo assai importante per il monitoraggio della falda, in riferimento alla sicurezza dell'impianto di discarica.

In considerazione di quanto detto, questi pozzi non possono essere considerati né "a monte" né "a valle" della discarica, quanto piuttosto "in corrispondenza" della potenziale sorgente d'inquinamento.

Un presupposto necessario, affinché siano prelevati campioni significativi delle caratteristiche dell'acqua di falda, è che venga effettuato un sufficiente pompaggio di acqua, prima della raccolta dei campioni da esaminare.

L'acqua presente all'interno di un pozzo non in funzione è infatti in contatto diretto con l'atmosfera esterna; alcuni gas disciolti possono allontanarsi, se sono presenti nell'acqua con concentrazioni superiori a quelle di equilibrio con la pressione parziale degli stessi gas nell'atmosfera. Può anche verificarsi che gas contenuti nell'atmosfera possano disciogliersi nell'acqua ferma all'interno del pozzo.

Lo scambio di gas tra l'acqua e l'atmosfera può quindi determinare notevoli variazioni della composizione dell'acqua, attraverso processi di ossidazione di alcune specie chimiche, precipitazione di composti insolubili, ecc. Va anche

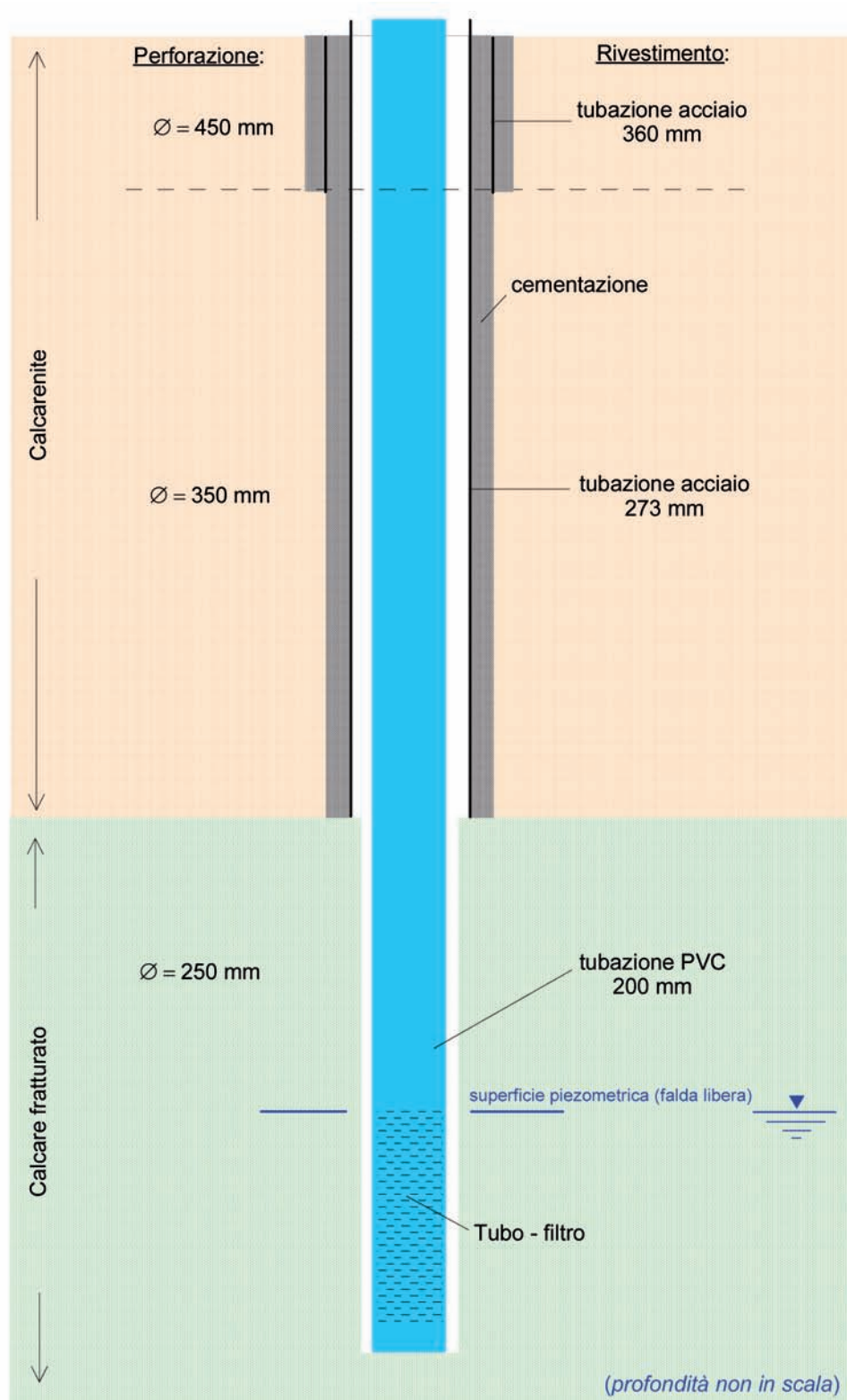


Figura 12 – Schema costruttivo dei pozzi di monitoraggio PZ1, PZ2, PZ3

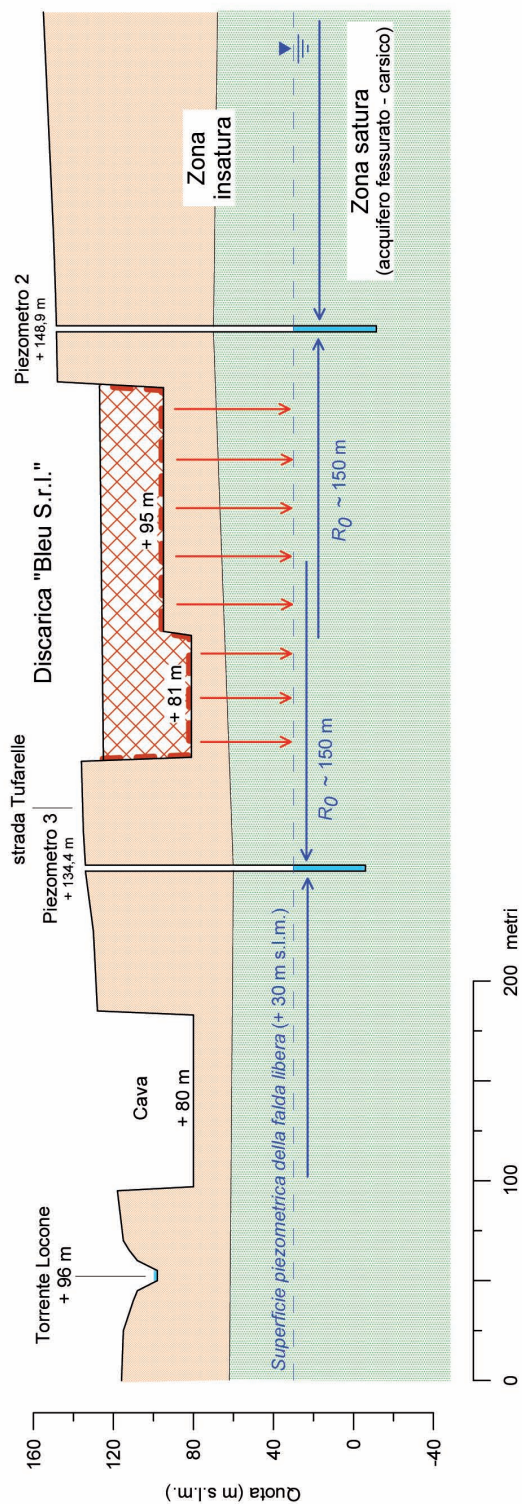


Figura 13 – Moto forzato dell'acqua di falda durante il campionamento dinamico dei pozzi PZ1 e PZ2

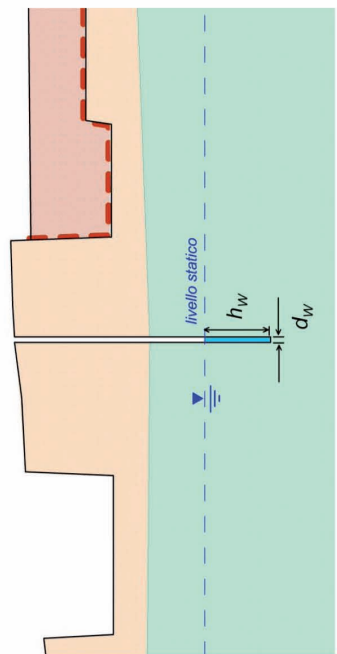


Figura 14 – Volume di acqua all'interno di un pozzo

tenuto conto delle modificazioni della composizione dell'acqua, che si possono determinare a seguito del prolungato contatto con la tubazione metallica del pozzo e con le parti immerse dell'impianto di sollevamento.

Prima del campionamento è quindi necessario far fluire attraverso il pozzo un volume di acqua (V_o) pari ad alcune volte il volume interno della perforazione (V_i), compreso tra la profondità del fondo pozzo (B) e la profondità del livello idrico, in condizioni statiche (H):

$$V_i = \pi \cdot \frac{d_w^2}{4} (B - H) = \pi \cdot \frac{d_w^2}{4} \cdot h_w$$

dove d_w è il diametro di perforazione del pozzo e h_w corrisponde allo spessore di acqua nel pozzo (**figura 14**).

Per assicurare il ricambio completo dell'acqua all'interno del pozzo è necessario far fluire un volume (V_o) da 3 a 5 volte il volume interno (V_i).

Per i pozzi che non dispongono di contatore del volume prelevato, dopo aver misurato la portata estratta dal pozzo (Q), con ad esempio un recipiente di volume noto e un cronometro, è necessario attendere il tempo minimo prima del campionamento dato da:

$$t_0 = \frac{V_o}{Q}$$

Per quanto detto il campionamento effettuato in *condizioni dinamiche*, se correttamente effettuato, fornisce dati più significativi rispetto al *campionamento statico*, che comporta il prelievo di campioni di acqua ferma all'interno del pozzo. In alcuni casi, il confronto tra i dati provenienti dal campionamento statico e dinamico può fornire informazioni aggiuntive per studiare situazioni d'inquinamento della falda.

Il sistema di controllo della falda in località Tufarelle è costituito, come accennato all'inizio del paragrafo, da altri pozzi, distribuiti in modo tale da coprire piuttosto uniformemente l'area della contrada. Essi attraversano i medesimi livelli dell'acquifero fessurato – carsico intercettati dai pozzi PZ1, PZ2, PZ3, P7.

In riferimento alla direzione di movimento delle acque sotterranee, che fluiscono verso SE (cfr. §. 4), i pozzi Lenoci e Leone S., situati a nord dell'impianto della Bleu S.r.l., possono essere considerati rappresentativi delle condizioni della

falda nel settore "a monte" della discarica; i pozzi S. Giorgio e Candela, situati a sud dell'impianto, sono invece indicativi delle caratteristiche della falda "a valle" della discarica stessa.

Alcune caratteristiche dei pozzi utilizzati per il monitoraggio della falda dalla Bleu S.r.l. sono riportate in **tabella 9**.

	E (m)	N (m)	P (m)	LS (m)	Q (l/s)	Vi (m³)
P7	2603275	4555777	197	106	4,0	5,4
PZ1	2603293	4555727	156	106	5,5	2,5
PZ2	2603399	4555911	160	119	5,5	1,5
PZ3	2603140	4555860	140	104	5,8	1,5
Lenoci	2603308	4557243	210	111	11,7	5,9
Leone S.	2603425	4556650	210	119	16,7	5,4
S. Giorgio	2603397	4555114	300	110	15,0	11,4
Candela	2603115	4554391	117	80	5,0	2,2
Di Stasi (2)	2602032	4554377	210	119	30,0	5,4

Tabella 10 – Pozzi per il monitoraggio della falda idrica sotterranea per la Bleu S.r.l.; Legenda: E, est Gauss – Boaga; N, nord Gauss – Boaga; P profondità del pozzo; LS profondità del livello statico; Q portata del pozzo; Vi volume d'acqua all'interno del pozzo.

7. Considerazioni conclusive

Richiamando quanto detto in premessa circa le finalità del presente studio, rivolto a quanti, anche non specialisti, vogliano approfondire la conoscenza dell'idrogeologia della contrada Tufarelle, le considerazioni finali di questo studio sono espresse sotto forma di brevi risposte a domande generali riguardanti le caratteristiche della falda idrica sotterranea, nonché l'effettiva capacità del sistema di monitoraggio, utilizzato dalla Bleu S.r.l., di evidenziare un eventuale stato d'inquinamento delle acque sotterranee, riconducibile all'impianto di smaltimento rifiuti.

Si auspica in ogni caso che il lettore abbia interesse a leggere anche le parti precedenti della presente relazione, dove i concetti di seguito riassunti sono illustrati in modo più dettagliato, supportati dai dati e dalle misure effettuate per la realizzazione del presente studio.

1. Com'è costituito il sottosuolo di contrada Tufarelle?

In contrada Tufarelle, il sottosuolo è costituito da una roccia porosa indicata con il termine di *tufo calcareo* (o *calcarenite di Gravina*), fino alla profondità di circa 80 metri dall'originario piano campagna. Al di sotto della calcarenite si passa in modo piuttosto netto a una *successione di rocce calcaree e dolomitiche* stratificate e fratturate (successione carbonatica delle Murge).

All'interno della successione calcareo – dolomitica, a partire dalla profondità di 100 – 120 metri dalla superficie, si incontra la falda idrica sotterranea, in corrispondenza della quota sul livello del mare di circa 30 metri.

Le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo sono state riconosciute direttamente mediante perforazioni, profonde tra 140 e 160 metri, per la realizzazione dei pozzi di monitoraggio in prossimità dell'impianto di smaltimento della Bleu S.r.l. Le caratteristiche evidenziate nel corso delle perforazioni possono essere considerate rappresentative di tutta l'area del comprensorio di cave in contrada Tufarelle, con limitate variazioni da punto a punto.

In adiacenza della località Tufarelle, subito in sinistra del Torrente Locone, la successione calcarea risulta ribassata da faglie dirette, al di sotto di una successione, dello spessore variabile tra alcune decine e diverse centinaia di metri, di argille grigio – azzurre (argille subappennine), a loro volta ricoperte da modesti spessori di terreni alluvionali sabbiosi.

2. Che tipo di falda è presente nel sottosuolo?

La falda idrica sotterranea di località Tufarelle è contenuta in livelli della successione calcareo – dolomitica, permeabili per fessurazione e carsismo. A causa della notevole fessurazione della roccia, la conducibilità idraulica del mezzo acquifero è assai elevata.

La falda è del tipo libero, vale a dire non limitata verso l'alto da un'unità impermeabile. La superficie freatica della falda, che separa la zona di saturazione dalla

sovrastante zona insatura, è situata a quota di 30 metri s.l.m. La falda idrica intercettata dai pozzi di monitoraggio realizzati dalla Bleu S.r.l (pozzi PZ1, PZ2, PZ3) è la stessa che viene attraversata dagli altri pozzi privati, per uso agricolo, presenti nella zona.

La falda idrica di località Tufarelle è situata nella porzione periferica dell'acquifero carbonatico fessurato – carsico presente in tutta l'area delle Murge. Nella zona delle cave di contrada Tufarelle non è presente la falda idrica superficiale, che si rinviene invece, alla profondità di pochi metri dal piano campagna, in sinistra del Torrente Locone, limitatamente alle zone dove sono presenti depositi alluvionali sabbiosi, di esiguo spessore, sovrapposti alle argille grigio – azzurre che ricoprono il substrato carbonatico.

3. Come si muovono le acque sotterranee nel sottosuolo?

Una recente campagna di misure piezometriche mostra che il movimento naturale delle acque sotterranee in località Tufarelle avviene in direzione SE, con variazioni del carico idraulico molto basse (meno di un metro di variazione di carico idraulico per chilometro di distanza).

La zona di Tufarelle è situata a sud di una linea di spartiacque profondo (idrogeologico) che separa il settore esterno (o "adriatico") dell'acquifero delle Murge, dal settore interno (detto anche "bradanico"). Lo spartiacque è situato tra gli abitati di Canosa di Puglia e Minervino Murge, poco a nord della località Tufarelle, e si estende in direzione NW – SE, parallelamente al senso di allungamento dello rilievo delle Murge.

A nord della linea spartiacque, la falda si muove in direzione del Mare Adriatico, dove scaturisce in corrispondenza di sorgenti costiere o sottomarine. A sud della linea, le acque sotterranee si dirigono invece in direzione SE, parallelamente alla scarpata interna delle Murge, secondo la direzione che passa per i territori di Minervino Murge, Spinazzola, Poggiorsini, Gravina, fino ad arrivare, dopo aver ricevuto i contributi delle acque che si infiltrano nei territori delle Murge di Matera e di Castellaneta, alle sorgenti del Tara, a ovest di Taranto. Il distretto di sorgenti del Tara rap-

presenta l'unica fuoriuscita possibile per le acque sotterranee del settore interno delle Murge.

I bassissimi valori del gradiente idraulico nella zona di Tufarelle sono collegati all'elevata conducibilità idraulica dell'acquifero e alla vicinanza alla zona dello spartiacque idrogeologico. Ai valori molto bassi del carico idraulico, corrispondono valori assai bassi del modulo della velocità di movimento delle acque sotterranee, nonostante l'elevata conducibilità idraulica del mezzo acquifero. Stime effettuate sulla base dei dati idrogeologici caratteristici dell'acquifero in questione, forniscono valori della velocità dell'acqua dell'ordine di alcune centinaia di metri all'anno.

Oltre che secondo la direzione del gradiente idraulico "naturale" della falda, determinata dalla struttura e dalle modalità di alimentazione dell'acquifero, l'acqua si muove nel sottosuolo, in conseguenza del gradiente idraulico indotto dal prelievo dai pozzi. L'effetto del "moto forzato", indotto dal pompaggio, si manifesta con il movimento radiale dell'acqua verso il punto di prelievo, all'interno di una zona individuata dal raggio di *influenza* del pozzo. L'estensione del raggio d'influenza del pozzo è proporzionale alla portata estratta e in relazione ai parametri idrogeologici del mezzo acquifero. Nel tipo di acquifero considerato, in riferimento alle condizioni tipiche di prelievo, il raggio di influenza dei pozzi può essere stimato dell'ordine di alcune centinaia di metri.

4. Quali sono le principali caratteristiche geochimiche naturali delle acque di falda in località Tufarelle?

Le acque sotterranee in località Tufarelle presentano caratteristiche di composizione naturale piuttosto particolari, se confrontate con le acque tipiche dell'acquifero carbonatico delle Murge. In tutta la zona di Tufarelle e più a ovest, in sinistra del Torrente Locone e del Fiume Ofanto, le acque di falda hanno conducibilità elettrica e un contenuto salino più elevato rispetto ad altre zone interne dell'acquifero delle Murge.

La caratteristica più evidente è la presenza di *solfuro d'idrogeno* disciolto, rilevabile dal caratteristico odore dell'acqua prelevata dai pozzi. All'esistenza di solfuro disciolto

si associano valori assai bassi del potenziale di ossido – riduzione, a indicazione di un ambiente geochimico fortemente “riducente”, in grado di influenzare la mobilità geochimica di alcune specie.

Le condizioni riducenti hanno effetto sulla mobilità degli ioni ferro e manganese, presenti in alcuni minerali accessori delle rocce che costituiscono l’acquifero. Lo ione nitrato, che rappresenta la forma ossidata dell’azoto inorganico, è generalmente assente e si può ritenere che l’azoto sia disciolto nelle forme ridotte di azoto molecolare o di ione ammonio.

Nelle acque sotterranee della contrada Tufarelle e, in misura maggiore nell’acquifero del substrato carbonatico nella zona in sinistra del Fiume Ofanto, è stata rilevata anche la presenza degli ioni stronzio, bromuro e ioduro.

Le specifiche caratteristiche delle acque sotterranee sono spiegabili con la presenza di un fenomeno di mescolamento delle acque di falda di origine meteorica con acque associate alle manifestazioni di idrocarburi presenti nelle parti più profonde del Tavoliere di Puglia.

5. Come sono ubicati i pozzi di controllo della falda, in riferimento alle fonti potenziali d’inquinamento e alle caratteristiche idrogeologiche dell’acquifero?

I pozzi PZ1, PZ2 e PZ3 sono stati realizzati con lo scopo di determinare le caratteristiche dell’acqua di falda nella zona più prossima alla discarica di rifiuti della Bleu S.r.l. Questi pozzi, unitamente al pozzo P7 della stessa società, prelevano acqua di falda da una porzione di acquifero all’interno del raggio d’azione dei pozzi, inclusa la zona posta direttamente al di sotto della discarica.

Considerata l’estrema vicinanza al corpo della discarica, questi pozzi non possono essere quindi considerati né “a monte” né “a valle” dell’impianto, ma piuttosto “in corrispondenza” dello stesso. In riferimento ai risultati dello studio piezometrico effettuato per il presente studio, che individua una direzione di deflusso della falda verso SE, i pozzi “a valle” della discarica possono essere considerati quelli situati a sud dell’impianto della Bleu S.r.l.; viceversa possono essere considerati “a monte” i pozzi situati a nord della discarica.

Per quanto riguarda il movimento della falda idrica, bisogna comunque tenere presente che, in punti localizzati dell'acquifero, la direzione di flusso della falda può scostarsi sensibilmente da quella generale, a causa del condizionamento esercitato dalle direzioni di maggiore fessurazione della roccia acquifera (lungo le quali la conducibilità idraulica è maggiore).

Va tenuto conto inoltre dell'effetto indotto dai prelievi dei pozzi sulla direzione di movimento dell'acqua. Il "moto forzato" verso i pozzi, durante il pompaggio, modifica profondamente il campo di flusso naturale della falda, in relazione alla portata estratta, alla durata dei prelievi, al numero di pozzi simultaneamente in funzione e alla distanza tra gli stessi.

Il numero complessivo e l'ampia distribuzione dei pozzi di monitoraggio della Bleu S.r.l. consente di determinare le caratteristiche dell'acqua in zone situate sia in prossimità, che a monte e a valle anche degli altri vicini impianti di smaltimento (Solvic S.r.l., Cobema S.r.l.). Il monitoraggio della falda effettuato dalla Bleu S.r.l. consente quindi il controllo delle caratteristiche qualitative della falda in tutta l'area della contrada Tufarelle.

6. In quale modo viene effettuato il prelievo di campioni per il controllo qualitativo delle acque di falda?

I pozzi utilizzati per il controllo qualitativo delle acque di falda in località Tufarelle, sia appartenenti alla Bleu S.r.l. che ad altri privati, sono muniti di impianto di sollevamento e attestati nei medesimi livelli della falda idrica sotterranea.

Il prelievo avviene in *condizioni dinamiche*, con il pompaggio di acqua tale da assicurare l'estrazione, prima del campionamento, di un volume pari a diverse volte (da 3 a 5, secondo le norme tecniche e legislative) il volume di acqua interna al pozzo. L'operazione di pompaggio garantisce il ricambio dell'acqua presente all'interno del pozzo e assicura che l'acqua campionata sia quella direttamente proveniente dalla zona di acquifero circostante il pozzo stesso. Il metodo di prelievo dinamico fornisce campioni che possono considerarsi altamente rappresentativi delle caratteristiche delle acque di falda.

7. Cosa si osserverebbe nei pozzi di controllo nel caso di contaminazione della falda da parte della discarica dell'impianto della Bleu S.r.l.?

In generale, una discarica di rifiuti costituisce una fonte di inquinamento potenziale di dimensioni ragguardevoli. Nel caso di contaminazione della falda da parte del percolato di una discarica, gli effetti sulla falda idrica sotterranea, in una zona circostante e a valle della sorgente di inquinamento, sono in genere macroscopici: incremento della conducibilità elettrica dell'acqua di falda rispetto ai valori di base, considerevole aumento della concentrazione delle sostanze disciolte nell'acqua oppure comparsa di specie chimiche del tutto estranee, in molti casi variazione delle caratteristiche organolettiche dell'acqua.

L'ambiente chimico di una falda inquinata dal percolato di una discarica è fortemente riducente, per la presenza di elevate concentrazioni di azoto ammoniacale e di sostanza organica, accompagnata da valori alti del COD, del BOD, dell'ossidabilità. Sono in genere presenti alte concentrazioni di metalli tossici e numerosi composti organici cancerogeni.

Anche nel caso di uno stato di inquinamento minore, l'esistenza di concentrazioni anomale di sostanze nelle acque di falda, legata al fenomeno di contaminazione, può essere evidenziata facilmente attraverso l'analisi chimica di campioni di acqua prelevati all'interno della zona contaminata.

Quanto anzidetto può servire a illustrare ciò che, verosimilmente, si osserverebbe nei pozzi di controllo di località Tufarelle, nel caso di una perdita di percolato da parte della discarica della Bleu S.r.l. o degli altri impianti di smaltimento della zona.

Nel caso di un versamento di rilevante consistenza proveniente dall'impianto della Bleu S.r.l., nei pozzi più prossimi alla discarica (il pozzo P7 è situato a poche decine di metri dal bacino che accoglie i rifiuti, i pozzi PZ1, PZ2 e PZ3 sono solo leggermente più distanti), lo stato di contaminazione non potrebbe sfuggire nemmeno ad analisi sommarie, comprendenti solo pochi parametri principali (conducibilità elettrica, ossidabilità, COD, BOD, ecc.) e si manifesterebbe probabilmente con evidenti variazioni anche dei caratteri fisici e organolettici (presenza di schiuma, colorazione dell'acqua, odore putrescente di percolato, ecc.).

Nel caso di una contaminazione della falda di entità minore, la vicinanza dei pozzi di controllo PZ1, PZ2, PZ3 e P7 alla sorgente d'inquinamento, consentirebbe in ogni caso di evidenziare in modo chiaro e tempestivo la comparsa o l'incremento delle concentrazioni delle sostanze disciolte nell'acqua di falda.

8. Qual è lo stato qualitativo delle acque di falda di contrada Tufarelle in riferimento a possibili fenomeni di inquinamento?

Come detto in premessa, lo scopo della presente ricerca non è di fornire un giudizio sullo stato qualitativo delle acque di falda in relazione a possibili fenomeni d'inquinamento nel territorio di contrada Tufarelle o delle zone vicine studiate. Né tale giudizio potrebbe essere formulato in modo compiuto sulla base dei dati rilevati e delle analisi effettuate. Sono stati infatti determinati solo alcuni parametri che hanno interesse per lo studio geochimico delle acque sotterranee della zona, mentre per formulare un tale giudizio occorre effettuare una serie completa di specifiche determinazioni analitiche, in numero ben maggiore rispetto alle analisi effettuate per le finalità di questa ricerca.

Riguardo alla domanda in argomento, si può tuttavia osservare che le proprietà delle acque sotterranee, evidenziate con il presente studio, risultano compatibili con l'ambiente geochimico naturale della contrada Tufarelle e delle zone vicine. La composizione chimica delle acque di falda, i bassi valori del potenziale di ossido – riduzione, la presenza del solfuro d'idrogeno, la possibile presenza del ferro e del manganese ed eventualmente, in alcuni punti dell'acquifero, dello ione ammonio, sono caratteristiche naturali delle acque di falda, riferite al contesto geologico e idrogeologico del margine del rilievo delle Murge, in prossimità del Fiume Ofanto.

Il responsabile scientifico della Convenzione

Prof. Pietro Pagliarulo

Dipartimento di Geologia e Geofisica

Università degli Studi di Bari

Appendice – Valori dei parametri per la caratterizzazione del sottosuolo in contrada Tufarelle¹

Unità del sottosuolo:

A. Barriera argillosa (*zona insatura*): strato artificiale di argilla compattata, spessore 1 metro

B. Calcarenite ("tufo calcareo", *zona insatura*): roccia porosa, massiva (non stratificata), poco fratturata (distanza tra le fratture superiore a 10-20 metri); spessore dal piano campagna circa 75-80 metri; spessore dal fondo cava tra 20 e 35 metri)

C. Roccia calcarea fratturata (*zona insatura*): roccia compatta (non porosa), stratificata (spessore degli strati dal decimetro fino al metro o anche di più); molto fratturata (distanza tra le fratture anche di pochi decimetri); possibile presenza di cavità carsiche irregolarmente distribuite; spessore complessivo 25 – 40 metri

D. Roccia calcarea fratturata (*zona satura*): roccia compatta (non porosa), stratificata (spessore degli strati dal decimetro fino al metro o anche di più); molto fratturata (distanza tra le fratture anche di pochi decimetri); possibile presenza di cavità carsiche irregolarmente distribuite; all'interno di questa unità, si rinvencono diversi livelli acquiferi dello spessore ciascuno di alcuni metri.

Le unità C e D sono litologicamente identiche; sono distinte dalla superficie piezometrica della falda libera (*water table*).

¹ Parametri richiesti per l'applicazione del software Giuditta[®] (Provincia di Milano e URS Italia S.p.A.)

Parametri per la zona insatura:

Soggiacenza della falda: $L_{GW} = 104$ metri, in corrispondenza della strada comunale "Tufarelle", in prossimità dell'ingresso Solvic. E' data dalla quota del p.c. diminuita della quota della superficie piezometrica (30 m s.l.m.)

Franco di falda: $d_{ff} = 51$ metri in corrispondenza del 4° lotto; $d_{ff} = 65$ metri, in corrispondenza del 1° e 2° lotto. E' dato dalla distanza tra il fondo discarica e la superficie piezometrica della falda

Spessore della frangia capillare (h_{cap}): può essere assunto pari a zero nell'acquifero fessurato-carsico

Spessore della zona insatura (h_v): poiché la frangia capillare è assente, il valore è uguale alla soggiacenza (L_{GW})

Densità del suolo (ρ_s):

Unità A: $\rho_s = 1,9$ g/cm²; dai certificati di laboratorio DGG, Univ. Bari

Unità B: $\rho_s = 1,50$ g/ cm²; da valori di letteratura caratteristici per questo litotipo

Unità C: $\rho_s = 2,65$ g/ cm²; valore assumendo peso specifico della roccia 2,7 g/ cm² (calcite) e porosità 0,02

Porosità totale ed efficace del terreno non saturo ($\theta_{T,unsat}$; $\theta_{e,unsat}$)

Unità A: $\theta_{T,unsat} = 0,27$; $\theta_{e,unsat} = 0,09$ (dalla elaborazione dei dati di laboratorio DGG, Univ. Bari)

Unità B: $\theta_{T,unsat} = 0,45$; $\theta_{e,unsat} = 0,45$ (dai valori di densità scelti)

Unità C: $\theta_{T,unsat} = 0,02$; $\theta_{e,unsat} = 0,02$ (stima dei vuoti dovuti alla fatturazione)

Contenuto volumetrico di acqua (θ_w)

Unità A: $\theta_w = 0,27$ (argilla considerata satura)

Unità B: $\theta_w = 0,05$ (dal valore minimo riportato in tab. 25 relativo alle sabbie)

Unità C: $\theta_w = 0,00$ (roccia anidra)

Contenuto volumetrico di aria (θ_a):

Unità A: $\theta_a = 0,00$ (argilla considerata satura, quindi priva di aria nei pori)

Unità B: $\theta_a = 0,40$ (ottenuto sottraendo il contenuto volumetrico d'acqua alla porosità totale)

Unità C: $\theta_a = 0,02$ (roccia anidra)

Contenuto volumetrico di acqua e di aria nella frangia capillare ($\theta_{w, cap}$, $\theta_{a, cap}$)

Lo spessore della frangia capillare è nullo nel caso specifico

Coefficiente di dispersività longitudinale ($\alpha_{x, unsat}$)

Unità A: nelle argille il valore può essere posto uguale a 0,00 (mezzo non disperdente, propagazione *tipo plugflow*) oppure assumendo un valore assai piccolo ($<0,01$ m)

Unità B: $\alpha_{x, unsat} = 1,57$ m, calcolato per lo spessore minore dell'unità di 20 metri, applicando la formula empirica di Xu e Eckstein (1995)

Unità C: $\alpha_{x, unsat} = 1,86$ m, calcolato per lo spessore minore dell'unità di 25 metri, applicando la formula empirica di Xu e Eckstein (1995)

Conducibilità idraulica verticale a saturazione (K_{sat}):

Unità A: $K_{sat} = 8,5E-10$ m/s, dalle prove di laboratorio (certificati DGG, Università di Bari)

Unità B: $K_{sat} = 6,0E-05$ m/s, da valori tipici di letteratura per tale litotipo

Unità C: $K_{sat} = 1,0E-02$ m/s, valore caratteristico di roccia calcarea molto fratturata

Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo (f_{oc}):

Uguale a 0,00 nelle unità considerate, poiché è presente solo la frazione minerale

Parametri per la zona satura:

Direzione di flusso dell'acquifero: N 135°; perpendicolare alle linee isopiezometriche ottenute da misure dirette (rilievo del 14 maggio 2009)

Spessore dell'acquifero (d_{sw}):

$d_{sw} = 10$ metri. L'acquifero, presente fino alle profondità di 1000 metri e oltre, non ha una base definita. Per questo lo spessore complessivo dell'acquifero può essere posto pari alla somma degli spessori dei singoli livelli acquiferi attraversati dai pozzi. Il valore è uguale allo spessore della zona di mescolamento, in modo da non computare alcuna diluizione degli inquinanti e quindi le condizioni di calcolo più severe

Spessore della zona di mescolamento (δ_{gw}):

$\delta_{gw} = 10$ metri. Vedi punto precedente

Gradiente idraulico della zona satura (i):

$i = 6.7E-04$; valore calcolato dalla mappa delle isopieze allegata, in corrispondenza della zona PZ1 e PZ3

Conducibilità idraulica a saturazione del terreno saturo (K_{sat}):

$K_{sat} = 1,0E-02$ m/s. Valore caratteristico di roccia calcarea molto fratturata

Porosità totale del terreno in zona satura ($\theta_{T,sat}$):

$\theta_{T,sat} = 0,02$ (stima dei vuoti dovuti alla fratturazione)

Velocità di Darcy (v_{gw}):

$v_{gw} = 6,7E-06$ m/s = $6,7E-04$ cm/s = 21129 cm/anno

Velocità media effettiva della falda (v_e):

$v_e = 3,35E-04$ m/s = $3,35E-02$ cm/s = 1056456 cm/anno

Coefficienti di dispersività longitudinale, trasversale e verticale ($\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$):

$\alpha_x = 1,86$ m; $\alpha_y = 0,60$ m; $\alpha_z = 0,09$ m

Frazione di carbonio organico presente nel suolo saturo

Uguale a 0,00 nell'acquifero considerato, poiché è presente solo la frazione minerale.

Bibliografia

Geologia

- Balduzzi A., Casnedi R., Crescenti U., Mostardini F., Tonna M. (1982) - Il Plio-pleistocene del sottosuolo del Bacino Lucano (Avanfossa Appenninica), *Geologica Romana*, **21**, 89 – 111.
- Balduzzi A., Casnedi R., Crescenti U., Tonna M. (1982) – Il Plio – pleistocene del sottosuolo del Bacino Pugliese (Avanfossa Appenninica), *Geologica Romana* **21**, 1 – 28.
- Casnedi C., (1988) – La fossa Bradanica: origine, sedimentazione e migrazione. *Memorie della Società Geologica Italiana*, **41**, 439 – 448.
- Mongelli F., Ricchetti G. (1970) – The earth's crust and heat flow in the in the Fossa Bradanica, southern Italy. *Tectonophysics*, **10**, 103 – 125.
- Ricchetti G. (1979) – Contributo alla conoscenza strutturale della Fossa Bradanica e delle Murge, *Bollettino della Società Geologica Italiana*, **99**, 421 – 430.
- Sella M., Turci C., Riva A. (1988) – Sintesi Geopetrolifera della fossa Bradanica (Avanfossa della Catena Appenninica Meridionale), *Memorie della Società Geologica Italiana*, **41**, 87 – 107.

Idrogeologia

- Maggiore M., Nuovo G., Pagliarulo P., (1996) – Caratteristiche idrogeologiche e principali differenze idrochimiche delle falde sotterranee del tavoliere di Puglia. *Memorie della Società Geologica Italiana*, **51**, 669 – 684.
- Maggiore M., Pagliarulo P., (2004) – Circolazione idrica ed equilibri idrogeologici negli acquiferi della Puglia. *Geologi e territorio*, **1**, 13 – 35.
- Oliver J. (1986) – Fluids expelled tectonically from orogenic belts: Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena, *Geology*, **14**, 99 – 102.
- Pagliarulo P. (1996) – Migrazione di fluidi profondi nel substrato preplioceno dell'Avanfossa Appenninica (bacino pugliese e lucano). *Memorie della Società Geologica Italiana*, **51**, 650 – 668.

Idrogeochimica

- Appelo C. A. J., Postma D., – Geochemistry, Groundwaters and Pollution. A.A. Balkema., Rotterdam, 1996.
- Brewer P. G., Spencer D. W. (1971) – Colorimetric determination of Manganese in anoxic waters, *Notes of American society of Limnology and Oceanography*, **16 (I)**, 107 – 110.
- Morgan J. J., Stumm W. (1965) – Analytical chemistry of aqueous manganese. *J. Amer. Water Works Ass.* **57**, 107 – 119.
- White D. E. (1957) – Magmatic, connate and metamorphic waters. *Bulletin of the Geological Society of America*, **68**, 1669-1682.



Bleu srl Editore

