

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

Modellazione numerica del sottosuolo relativa
al disastro ambientale di Bussi sul Tirino.

Candidato:
Michele Lerro

Relatore:
Prof. Alessandro Gargini

Correlatore:
Dott.ssa Maria Filippini

INDICE

	Pag.
Riassunto	3
1. Introduzione	4
2. Inquadramento geografico	5
3. Inquadramento climatico	8
4. Inquadramento geologico	10
4.1 Cenni sull'Appennino centro-meridionale	10
4.2 Geologia delle Gole di Popoli e della bassa valle del Tirino	10
4.3 Origine dei depositi quaternari di fondovalle	12
5. Inquadramento geomorfologico	16
5.1 La bassa valle del fiume Tirino	18
6. Inquadramento idrogeologico	19
6.1 Acquiferi a porosità per frattura e/o carsismo	19
6.2 Acquiferi a porosità per frattura ed interstizi.	21
6.3 Geochimica delle acque	22
7. Gestione dello stabilimento	23
7.1 Il disastro ambientale	25
7.2 La messa in sicurezza provvisoria	26
7.3 Il campo pozzi di Colle Sant'Angelo	28
8. Gli idrocarburi clorurati	29
8.1 Il Tetracloroetilene	31
8.2 Effetti del PCE sulla salute	31
9. I modelli numerici	32
9.1 Costruzione di un modello	33
9.2 Modellazione numerica alle differenze finite	36
10. Implementazione del modello di flusso	37
10.1 Definizione della griglia	38
10.2 Suddivisione in layers	39
10.3 Piezometria di riferimento	40
10.4 Inserimento del campo pozzi	43
10.5 Stima della ricarica	44
10.6 Il fiume Pescara ed i carichi costanti	45
10.7 Flussi ortogonali alla valle (diluizione)	46
10.8 Esecuzione della modellazione	47
10.9 Output del modello di flusso	48
10.10 Presentazione dei risultati	50
11. Implementazione del modello di trasporto	51
11.1 Input della contaminazione	53
11.2 Parametri MT3D-MS	54
11.3 Output del modello di trasporto	55
11.4 Presentazione dei risultati	62
12. Conclusioni	63
Bibliografia	64

RIASSUNTO

L'elaborato si occupa del disastro ambientale avvenuto nella seconda metà del '900 in Località Bussi sul Tirino, in provincia di Pescara, in seguito all'apertura abusiva della discarica Tre Monti, nella quale sono stati sversati contaminanti, tra cui idrocarburi clorurati.

La discarica si trova a monte del Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo, destinato ad uso potabile. Entrambi i siti sono situati nella valle del fiume Pescara, inserita all'interno delle Gole di Popoli.

Dopo aver inquadrato l'area di studio da un punto di vista geografico, climatico, geologico, geomorfologico ed idrogeologico, si è proceduto ad elaborare un modello concettuale del sistema naturale, per poi trasferirlo in un modello numerico tramite *Visual Modflow 4.6* ©.

A tal proposito si è esaminata la stratigrafia della valle del Fiume Pescara, inserendo nel modello i seguenti strati: ghiaie superficiali, limi argillosi, travertini e ghiaie profonde, ciascuno avente la propria conducibilità idraulica.

Sono stati stimati i contributi ortogonali alla valle, l'emungimento nel tempo del Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo, la ricarica, al netto dell'evapotraspirazione (mediante la formula di Turc) ed il contributo del fiume Pescara al sistema.

È stato quindi implementato un modello di flusso, calibrato sulla base di una piezometria elaborata nel 2012, realizzata in seguito alle indagini per la caratterizzazione del sito contaminato.

Successivamente, si è simulato il trasporto di tetracloroetilene, sostanza maggiormente rilevata nelle indagini, osservandone l'evoluzione nel tempo di modellazione, che va dal 1963, anno in cui è stata aperta la discarica, al 2012, anno in cui è disponibile il primo rilevamento di concentrazione del PCE, pari a circa 5 µg/L presso il campo pozzi, ben oltre alla CSC fissata a 1,1 µg/L (D.lgs. 152/06).

Pertanto, mediante l'implementazione di un modello di trasporto, si è stimato che per giustificare una tale concentrazione, la discarica debba aver sversato del tetracloroetilene nella quantità di 800 µg/L, che ha contaminato prevalentemente il travertino, per un periodo di 49 anni.

Osservando l'incremento della contaminazione nel tempo, si è stabilito che il campo pozzi è stato interessato in modo significativo a partire dagli anni '70, pertanto si presume che chiunque abbia bevuto le acque servite dal campo pozzi, ovvero la maggioranza della popolazione della città di Pescara, sia stata soggetta all'azione nociva del PCE.

1. INTRODUZIONE

L'acqua è un bene prezioso e le falde acquifere estremamente vulnerabili. Questo concetto spesso è sottovalutato, sconosciuto e talvolta volontariamente ignorato.

Con il progredire delle attività industriali, nel corso del '900, il rischio che questo bene prezioso venga compromesso è esponenzialmente aumentato, a causa di possibili incidenti, per negligenza o per totale disinteresse nei confronti del bene stesso.

Al fine di mostrare quanto facilmente questi incidenti possano essere dannosi per l'ambiente e, conseguentemente, per la stessa salute umana, questo elaborato prenderà in esame un disastro ambientale avvenuto nel XX secolo nei pressi di Bussi sul Tirino, sito in Italia Centrale, in provincia di Pescara.

Suddetto paese è attraversato dal fiume Pescara che ha, come affluente, appunto il Tirino.

Presso la Località Bussi Officine fu creata una discarica abusiva dove, a partire dal 1963, iniziò uno sversamento senza scrupoli di diverse sostanze contaminanti, per decenni, causato dalla società Montecatini e proseguito da società successive.

Più a valle del Fiume Pescara, lungo le Gole di Popoli, era operativo il Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo, composto da una serie di pozzi che emungevano acqua ad uso potabile.

Per molti anni la contaminazione è proseguita indisturbata, finché furono avviate delle indagini e venne istituito un procedimento giudiziario.

Nel 2012 è stata effettuata una specifica campagna di indagine per valutare la situazione della contaminazione, tuttavia, resta ignota l'entità della contaminazione pervenuta ai pozzi durante i numerosi anni precedenti lungo i quali è avvenuto lo sversamento indiscriminato.

Lo scopo di questo elaborato è avvalersi della modellazione numerica per costruire un modello di flusso che simuli il più possibile le condizioni dell'ambiente reale, a cui successivamente applicare un modello di trasporto per stimare l'avvelenamento dei pozzi nel corso del tempo, prima del 2012.

In questo modo, sarà possibile rendersi conto di quanto possa essere stato grave il danno per l'ecosistema, di cui l'uomo è parte, anche se spesso lo ignora, più o meno volutamente.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area di studio è localizzata in Italia centrale, in Abruzzo, nel comune di Bussi sul Tirino, in provincia di Pescara (Figura 2).

Più precisamente, comprende la porzione di fondovalle del fiume Pescara, denominata Gole di Popoli nel tratto poco a valle del paese di Popoli, ed il punto in cui la valle sbocca al di fuori dei massicci carbonatici che la delimitano.

Nel tratto studiato si ha la confluenza da sinistra idrografica del corso d'acqua Tirino (affluente del Pescara), proveniente da una valle dove è ubicato lo stabilimento industriale petrolchimico di Bussi Officine.

Nel fondovalle del Pescara sono anche ubicati la Discarica Tre Monti ed il Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo (Figura 3).

Il lato destro della valle è sormontato dal Colle delle Vacche (1500 m s.l.m.), propaggine settentrionale del massiccio del Morrone, che raggiunge la quota di 2061 m s.l.m.

Da un punto di vista altimetrico il piano-campagna varia tra la quota di 238 m s.l.m., in corrispondenza della discarica Tre Monti, e la quota di 207 m s.l.m., presso il campo pozzi di Colle Sant'Angelo.

Nei pressi della discarica Tre Monti, il fiume scorre a quota 236 m s.l.m. Subito dopo la convergenza col Tirino, è presente una chiusa ENEL che devia una parte del flusso in un canale artificiale per la produzione di energia idroelettrica.

A valle di tale chiusa, il fiume si trova alla quota di 232 m s.l.m., in base a misurazioni effettuate durante i mesi primaverili ed estivi del 2007 (Poillucci *et al.*, 2007), mentre a valle del campo pozzi, in allontanamento dalle Gole, il fiume scorre alla quota di 202 m s.l.m.

Il fiume prende il nome "Pescara" in località Popoli, dove confluiscono i fiumi Aterno e Sagittario.

Da un punto di vista macroscopico, la zona di studio è posizionata tra il confine meridionale del Parco Nazionale del Gran Sasso e dei Monti della Laga e quello nord-occidentale del Parco Nazionale della Majella, ai piedi del massiccio del Morrone (Figura 1).

Le principali vie di comunicazione sono l'Autostrada A25 Roma - L'Aquila, la Strada Statale 153, la Strada Regionale 5 e la ferrovia Roma-Pescara (Figura 4).

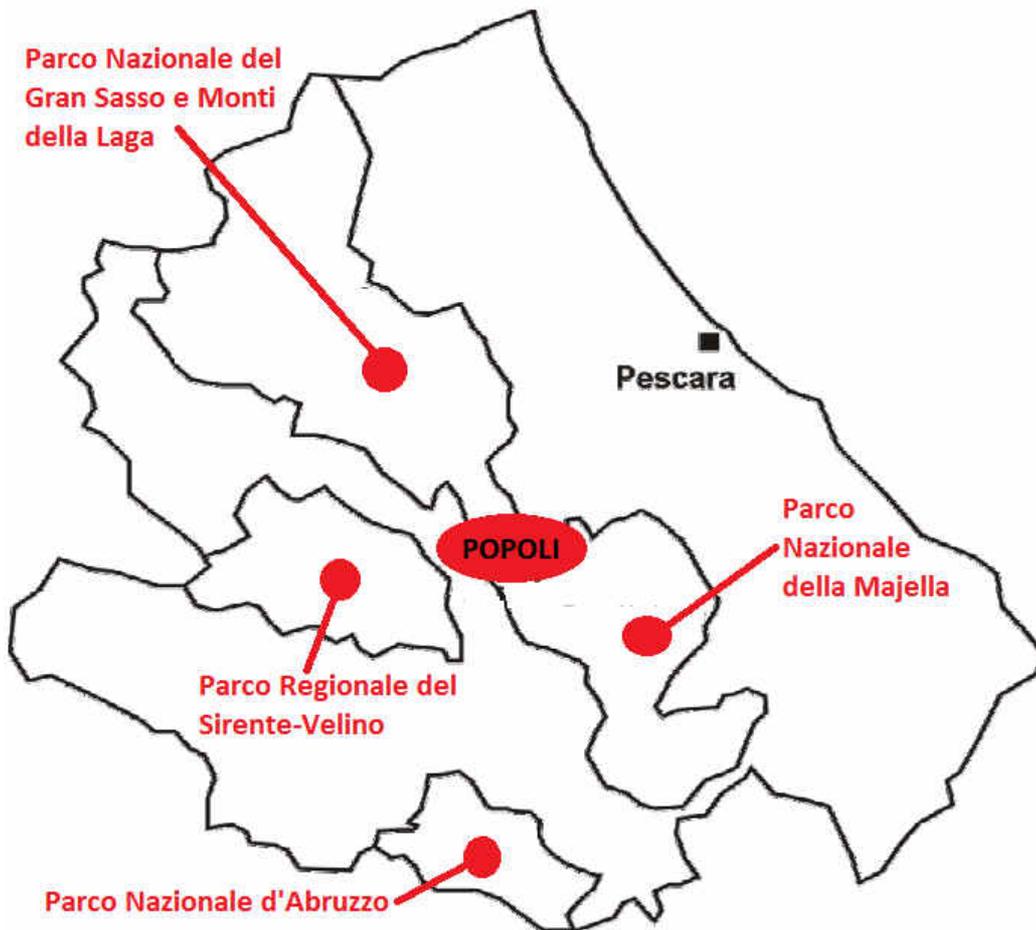


Figura 1: inquadramento geografico macroscopico.

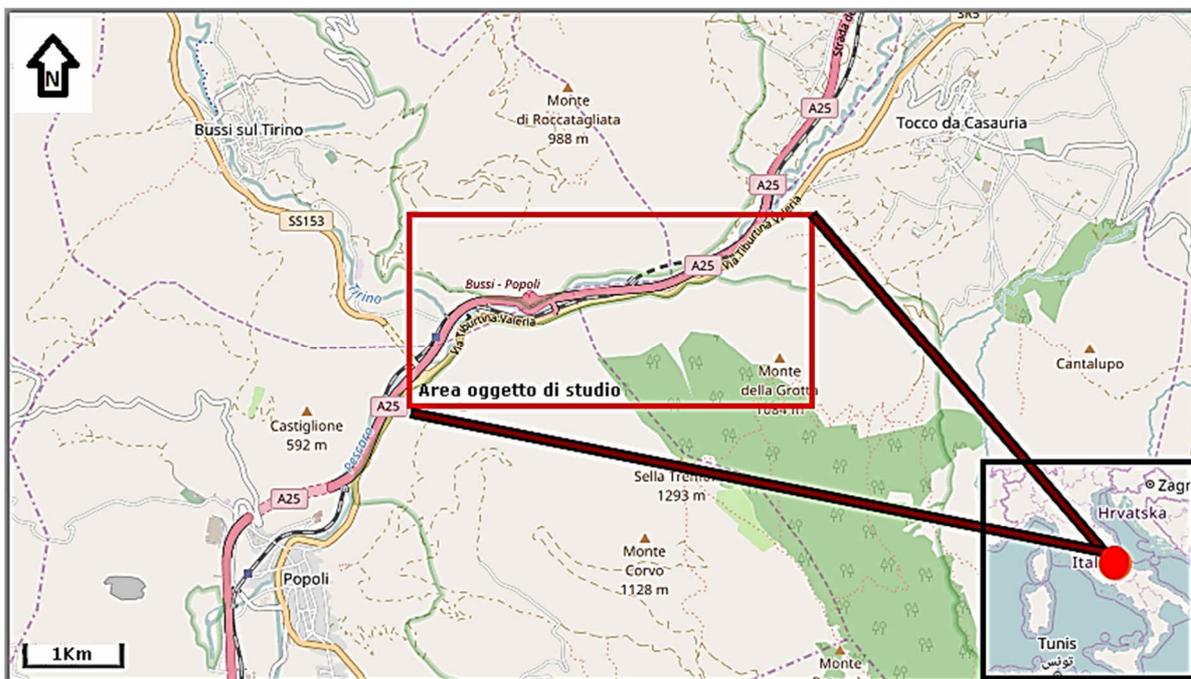


Figura 2: inquadramento dell'area in esame (OSM, 2017).

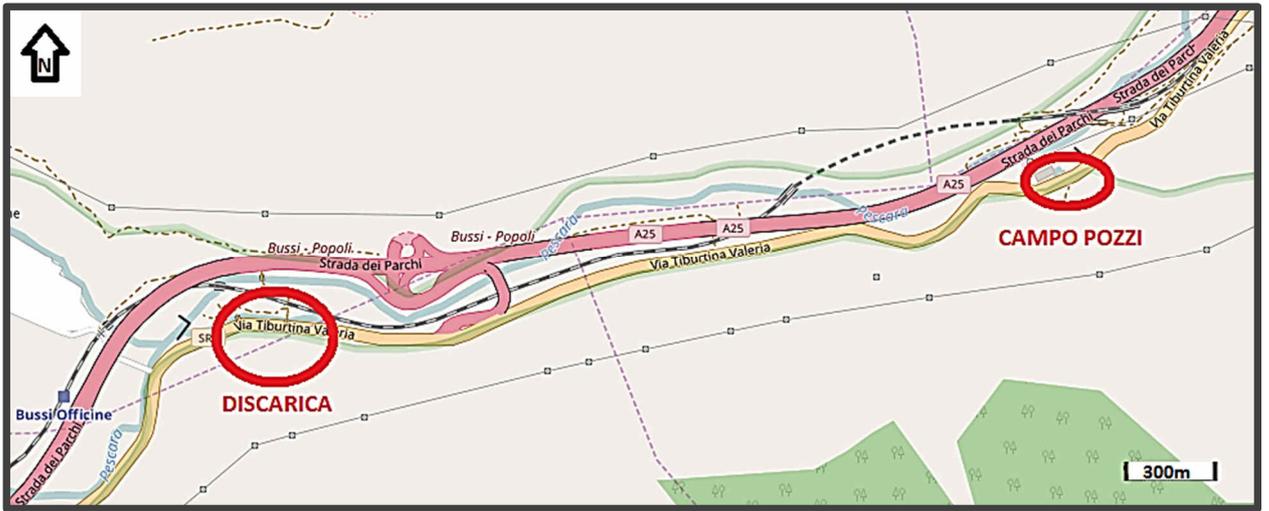


Figura 3: dettaglio dell'area comprendente la zona della discarica e del campo pozzi (OSM, 2017).

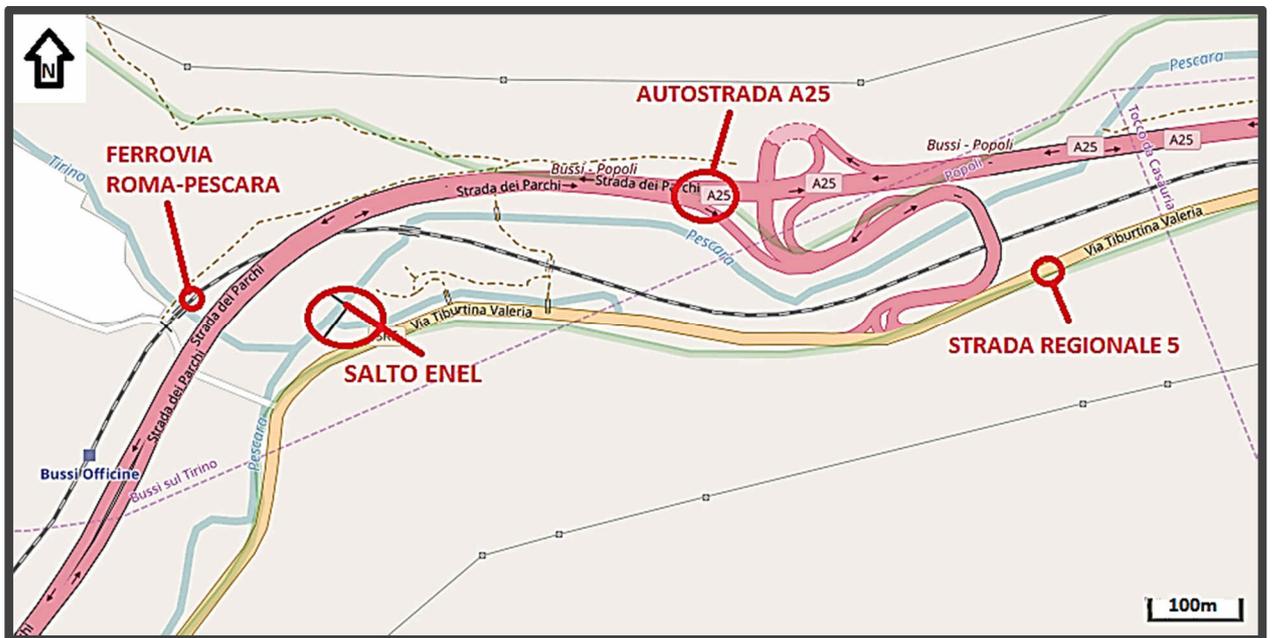


Figura 4: dettaglio delle principali vie di comunicazione e ubicazione del salto ENEL (OSM, 2017).

3. INQUADRAMENTO CLIMATICO

Secondo la classificazione climatica dell'Italia, proposta da Köppen-Geiger (Figura 5), il territorio del Comune di Bussi sul Tirino si trova in una zona classificabile con clima *Cfa*, quindi un clima da fascia temperata, subcontinentale umido, con estate molto calda (il mese più caldo ha temperatura media superiore a 22°C) ed assenza di una vera e propria stagione secca.

In questo contesto generale, si riscontra che il mese più caldo è Luglio, mentre il mese più freddo risulta Gennaio.

Le precipitazioni sono presenti in tutti i mesi dell'anno, con un massimo nel mese di Novembre ed un minimo nel mese di Luglio. La fenomenologia ad esse associata è costituita prevalentemente da eventi temporaleschi, dal periodo primaverile fino al periodo autunnale, mentre sono prevalenti piogge conseguenti a fronti caldi nel periodo invernale.

Le dinamiche meteorologiche corrispondenti ad episodi perturbati sono spesso pesantemente influenzate dall'orografia, in particolare sono le precipitazioni a risentire della disposizione di diversi gruppi montuosi, che bloccano gran parte dei venti umidi di origini sud-occidentali, riducendo notevolmente le precipitazioni ad essi associate, le quali, invece, interessano maggiormente i versanti occidentali dei suddetti gruppi. Più influenti sono invece le correnti provenienti da nord-est che, trovando meno ostacoli orografici, sono in grado di apportare condizioni più favorevoli alle precipitazioni. Tali correnti sono spesso accompagnate da episodi perturbati di carattere freddo che, nel periodo invernale, possono portare precipitazioni nevose, occasionalmente anche abbondanti, mentre nel periodo estivo possono determinare fenomeni temporaleschi associati a nubifragi, anche di notevole intensità.

Invece, in regime di alta pressione, la zona rispecchia le caratteristiche proprie al tipo di clima in cui è classificata, accentuata dalla sua posizione di fondovalle: in estate, infatti, si raggiungono temperature elevate, con massime spesso oltre i 30 °C, mentre nel periodo estivo l'alta pressione, unita ad una scarsa ventilazione, genera fenomeni da inversione termica, con nebbie e foschie nelle ore più fredde della giornata.

A titolo informativo, e come completamento al presente inquadramento climatico, si propongono, in Tabella 1, i principali parametri climatologici, raccolti nei loro valori medi per il periodo 1971-2000, nella stazione meteorologica di Pescara Aeroporto, stazione meteo relativamente vicina all'area di studio e appartenente alla rete nazionale dell'Aeronautica Militare, i cui dati sono utilizzati dall'Organizzazione Mondiale della Meteorologia.

PESCARA AEROPORTO (1971-2000)	Mesi												Stagioni				Anno
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Inv	Pri	Est	Aut	
T. max. media (°C)	11,2	11,9	14,4	17,7	22,3	26,3	29,2	29	25,6	20,7	15,5	12,4	11,8	18,1	28,2	20,6	19,7
T. min. media (°C)	1,8	2,2	3,9	6,7	11	14,8	17,2	17,3	14,4	10,5	5,9	3,2	2,4	7,2	16,4	10,3	9,1
Precipitazioni (mm)	48,1	52,2	56,8	56,9	31,7	46,2	34,4	55,5	61,2	72	79,8	62,9	163	145	136	213	657,7

Tabella 1: principali parametri climatici rilevati nella stazione meteorologica di Pescara Aeroporto, medie di riferimento 1971-2000 (servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare).

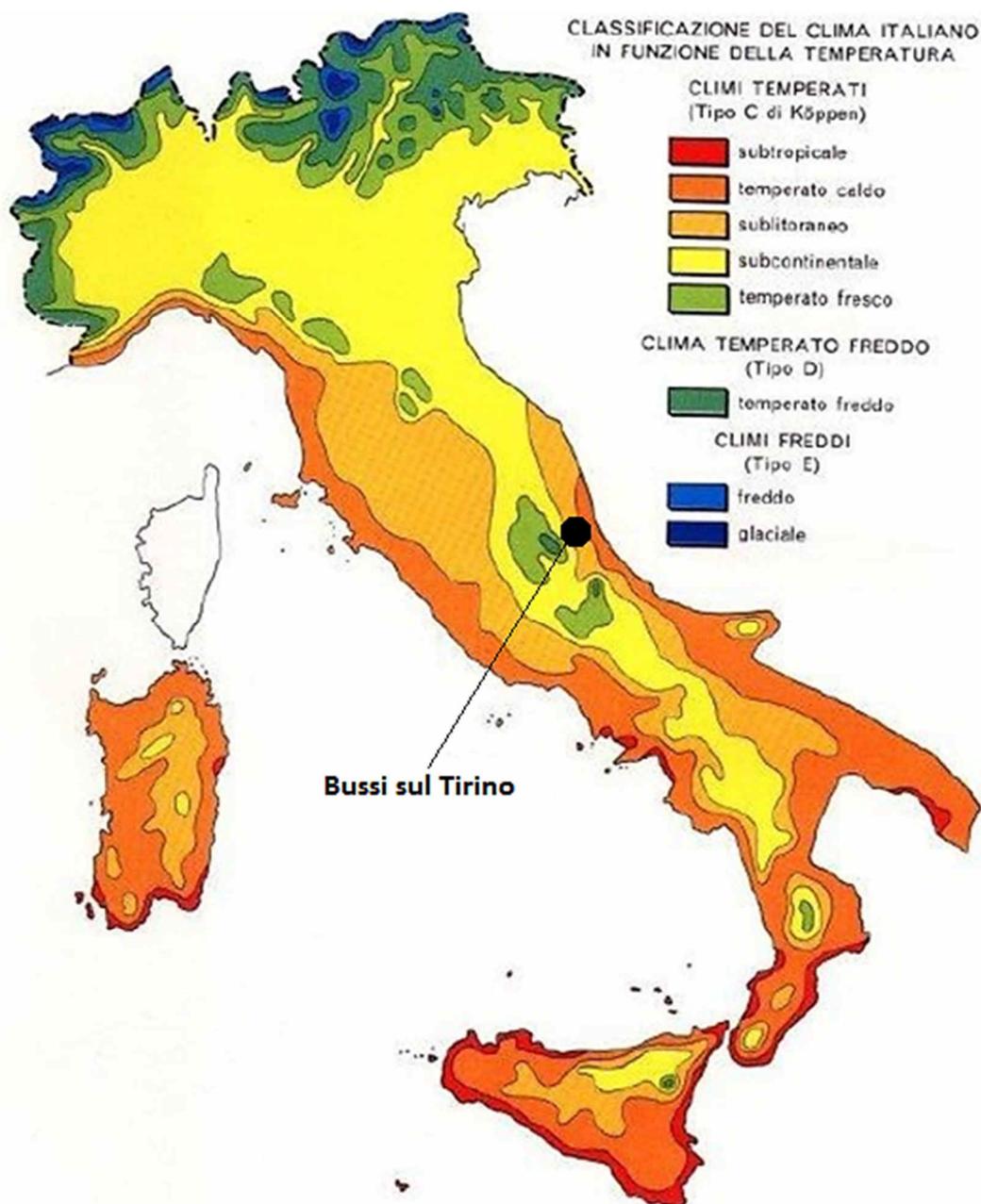


Figura 5: classificazione climatica d'Italia (Köppen-Geiger, 1953),

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

4.1 Cenni sull'Appennino centro-meridionale

L'Appennino centro-meridionale mostra grandi piattaforme carbonatiche aventi spessori di migliaia di metri ed estensioni di decine di chilometri quadrati (Bosellini, 2005), sviluppatasi, a partire dal Mesozoico fino all'Eocene, al di sopra del substrato evaporitico triassico. L'Appennino centro-meridionale si distingue dall'Appennino settentrionale mediante la linea Ancona-Anzio, consistente in un lineamento strutturale regionale trascorrente lungo il quale è avvenuto uno spostamento relativo delle due porzioni appenniniche. (Castellarin *et al.*, 1978).

L'orogenesi ha avuto inizio nel tardo Oligocene, mediante la formazione del bacino algero-provenzale-ligure e la rotazione verso est del blocco sardo-corso (Keary & Vine, 1994), mentre è terminata con l'acme orogenico del Miocene superiore, protraendosi, comunque, fino al tardo Pleistocene. Questo ha prodotto un impilamento delle falde e ha provocato l'emersione delle piattaforme carbonatiche, fra cui è possibile riconoscere i monti del Gran Sasso, del Morrone e della Majella.

In seguito, a partire dal tardo Pliocene, l'intera zona è stata sottoposta a distensione, a causa della migrazione verso sud-est dell'arco calabro-peloritano e dell'apertura del bacino tirrenico (Bosellini, 2005).

4.2 Geologia delle Gole di Popoli e della bassa valle del Tirino

L'area in esame è rappresentata nei fogli 359 e 369 della Carta Geologica d'Italia (scala 1: 50 000) ed è contraddistinta da una stretta gola allungata in direzione E/NE-W/SW, percorsa dal fiume Pescara, entro cui si immette, in confluenza da sinistra idrografica, la valle del fiume Tirino, più ampia e con fianchi meno ripidi. Consiste in una zona geologicamente complessa al confine tra l'Unità tettono-stratigrafica del Gran Sasso (a nord) e la porzione settentrionale dell'Unità del Morrone a sud (Centamore *et al.*, 2006) (Figura 6).

L'Unità del Gran Sasso, compresa nella più vasta Unità tettono-stratigrafica Gran Sasso-Genzana (*sensu* Calamita & Pizzi in cap. VIII di Centamore *et al.*, 2006), è prodotta dalla deformazione della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese, formatasi sia da unità con facies di ambiente di mare sottile sia da depositi sedimentati negli ambienti di transizione ai margini.

Nel corso dell'orogenesi appenninica mio-pliocenica, sedimenti marini terrigeni sinorogenici, prevalentemente silico-clastici in facies di flysch, si depositarono sopra le successioni di piattaforma.

Successivamente all'emersione della catena, avvenuta nel Pliocene, l'Unità del Gran Sasso-Genzana è stata interessata da intensi fenomeni erosivi, di carsismo e dalla deposizione di facies fluvio-lacustri all'interno delle depressioni createsi in seguito alla tettonica distensiva tardo-pliocenica.

Soprastanti all'Unità del Morrone, pure attribuita alla piattaforma laziale-abruzzese (Mostardini & Merlini, 1986; Conese *et al.*, 2001) e caratterizzata da facies carbonatiche di scogliera e depositi di scarpata con transizione ad ambienti bacinali, sono presenti calcareniti

del Miocene inferiore-medio e depositi flyschoidi, caratterizzati da argille siltose e peliti con intercalazioni arenacee e marnose, seguiti da corpi detritici calcarei del Miocene Inferiore e da marne argillose plioceniche.

Da un punto di vista strutturale, in corrispondenza della media-bassa valle del Fiume Tirino, procedendo da ovest verso est, è possibile distinguere la sovrapposizione dell'Unità del Gran Sasso, costituita da depositi carbonatici detritici di transizione, sull'Unità tettonica denominata M. Picca-M. Roccatagliata. Questa unità comprende i rilievi di M. Picca e M. Roccatagliata (Figura 7), disposti alla sinistra idrografica del fiume Tirino, e il rilievo di M. Castiglione, localizzato tra Popoli e Bussi Officine, alla sinistra idrografica del fiume Pescara. L'unità è considerata, da diversi autori, la continuazione verso nord della struttura del Morrone, sia per quanto riguarda la successione sedimentaria che per l'assetto strutturale (Bigi *et al.*, 1995).

Nei pressi dell'abitato di Bussi sul Tirino è possibile inoltre osservare, sul versante destro della valle, il sovrascorrimento del Gran Sasso, ovvero una superficie di scorrimento a basso angolo avente uno sviluppo NE-SW.

A partire dal Pliocene superiore, l'intera catena appenninica è stata sottoposta ad eventi tettonici distensivi, in buona parte riconducibili a processi di riattivazione tettonica di precedenti piani di sovrascorrimento. A questi si imputa la formazione di bacini intramontani tra cui il sistema di depressioni del Tirino, causa della disarticolazione del settore meridionale dell'Unità del Gran Sasso e riconducibile alla presenza di diversi sistemi di faglie, aventi andamento NW-SE, N/NW-S/SE e NE-SW (Giuliani & Sposato, 1995). Evidenza litostratigrafica del sistema di faglie è la presenza di notevoli depositi clastici continentali di età compresa tra il Pleistocene inferiore e l'Olocene (Giuliani & Sposato, 1995).

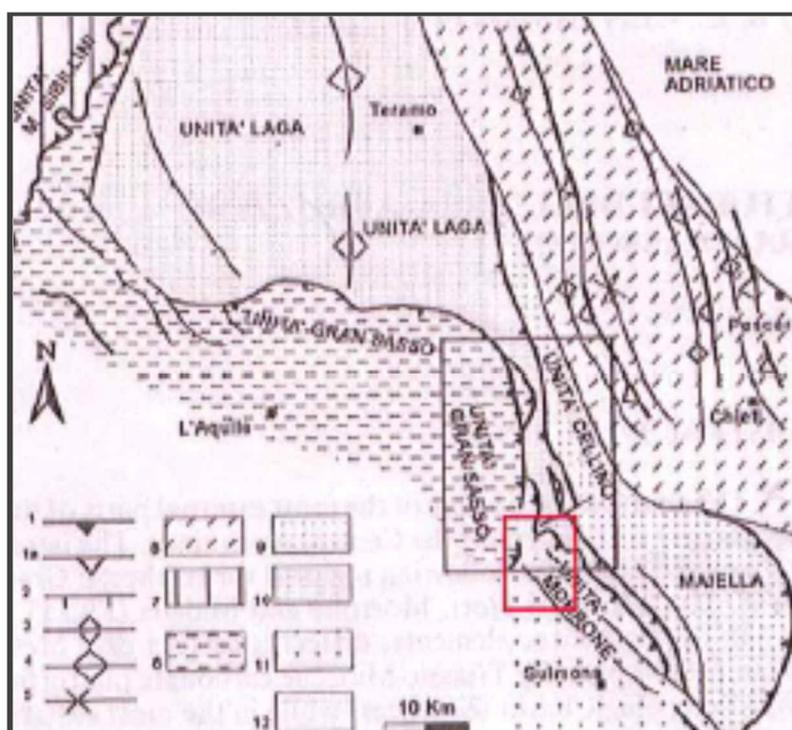


Figura 6: Schema strutturale del settore orientale dell'Appennino (da Bigi *et al.*, 1995).

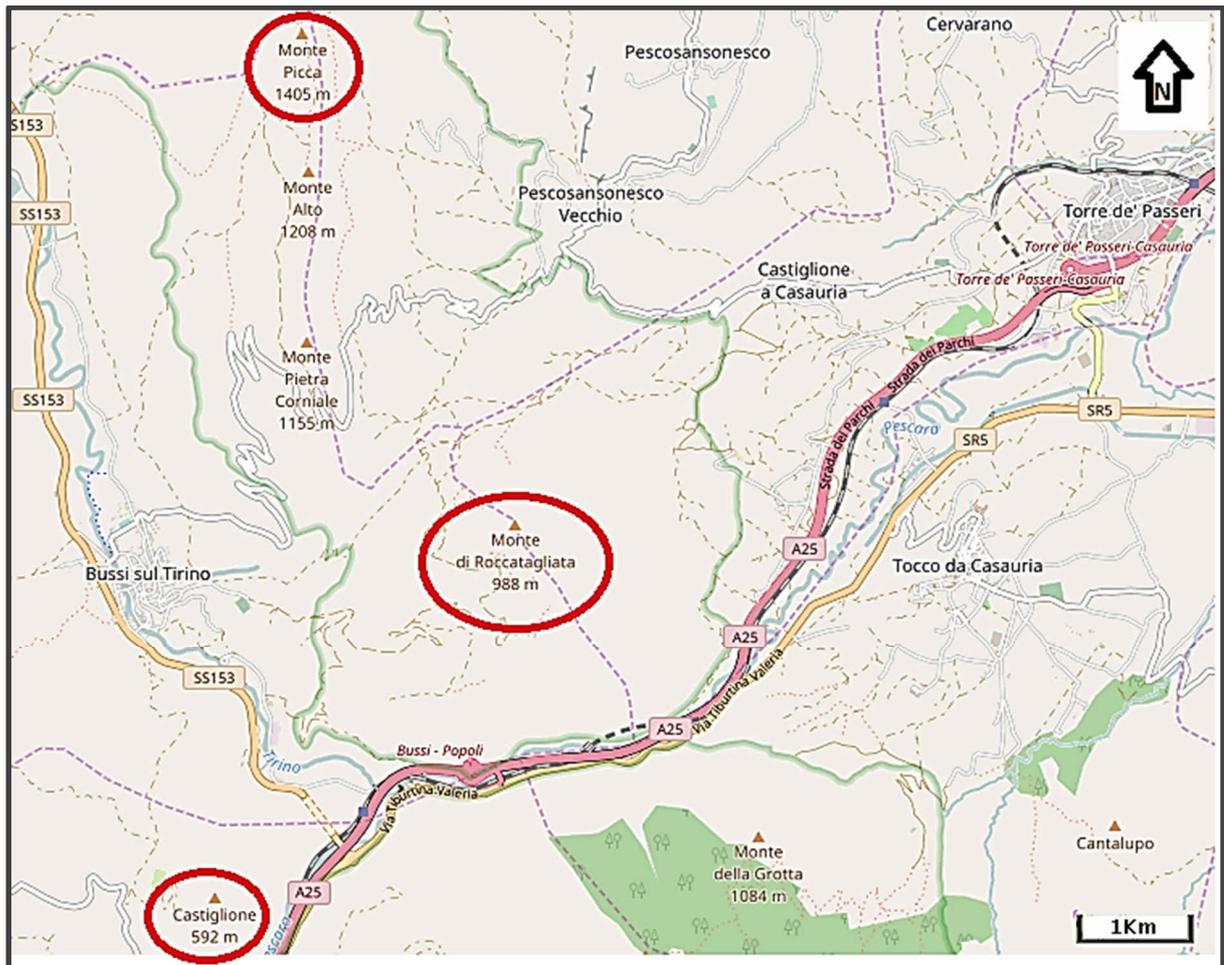


Figura 7: messa in evidenza di alcune cime citate nel Paragrafo 4.2 (OSM, 2017).

4.3 Origine dei depositi quaternari del fondovalle delle Gole di Popoli

Sia nella valle del Pescara (Gole di Popoli) che nella valle del Tirino vi è un riempimento sedimentario.

La successione clastica quaternaria sovrastante le brecce calcaree basali è composta da facies lacustri-palustri, con presenza di materiale clastico grossolano (Giuliani & Sposato, 1995), riconducibile a depositi di conoide, che si formarono ai lati della valle.

Nel corso della prima fase del Pleistocene, eventi erosivi provocarono l'incisione dei conglomerati e dei depositi lacustri-palustri della conca di Sulmona, posizionata a sud-ovest dell'area in esame. Si tratta di una conca tettonica, parzialmente colmata da una successione sedimentaria continentale complessa, la cui formazione è supposta iniziare nel Pleistocene inferiore (Miccadei *et al.*, 1998) e di cui le Gole di Popoli costituiscono la propaggine settentrionale. Contemporaneamente, infatti, oltre la soglia del bacino a est di Popoli, il fiume Pescara acuisce la sua gola nei carbonati del Morrone, fino a quote decine di metri più basse dell'attuale fondovalle (Miccadei *et al.*, 1998).

In seguito, durante la seconda fase del Pleistocene superiore, la sedimentazione riprese con la deposizione di travertini nella zona settentrionale della conca e nelle Gole di Popoli e, altrove, con un nuovo periodo di sedimentazione clastica, fluviale e di conoide, presumibilmente correlabile alle oscillazioni della glaciazione würmiana (Demangeot, 1973; Coltorti & Dramis, 1988).

Le Gole di Popoli, incise dal fiume Pescara, presentano ampiezza limitata e fianchi molto pendenti. Questa conformazione ha impedito l'accumulo di significativi spessori di depositi, contrariamente a quanto avvenuto nella valle del fiume Tirino. Tuttavia, sono presenti formazioni quaternarie di fondovalle e corpi di falda detritica e conoide alluvionale ai margini dei fianchi vallivi.

Le formazioni di fondovalle sono contraddistinte da depositi fluvio-lacustri e travertini potenti fino a 70 m. In particolare, il travertino si ritrova in facies fitoclastiche nel tratto iniziale delle gole, nei pressi dell'abitato di Popoli, per poi proseguire, nell'area della stazione di Bussi e di Bussi Officine, a un esteso e potente corpo di travertino autoctono che tende ad assottigliarsi a valle, fino essere sostituito da sedimenti alluvionali (Carrara, 1998). Questa sedimentazione è verosimilmente connessa alla formazione di sbarramenti di travertino formati lungo il corso del fiume Pescara, tra 23.000 e 6.000 anni fa (Lombardo *et al.*, 2001).

La successione stratigrafica del riempimento di fondovalle può essere dedotta dai sondaggi e dagli studi condotti nell'ambito delle esplorazioni geognostiche svolte per conto di ARTA Abruzzo nel 2007 (Poillucci *et al.*, 2007) ed integrate dal piano di caratterizzazione "Tre Monti" nel 2014 (Gargini *et al.*, 2014).

Sono presenti le seguenti unità, distinte dalla più bassa alla più alta in ordine stratigrafico:

(Si vedano Figure 8 e 9)

- Substrato calcareo
- Depositi di conoide e detrito di versante - complesso macroclastico inferiore
- Travertini - complesso travertinico
- Limi e argille lacustri, depositi alluvionali - complesso limoso argilloso lacustre
- Depositi fluviali - complesso macroclastico superiore
- Suolo (presente sotto la discarica con spessore variabile con massimo fino a circa 2 m)
- Terreno di riporto
- Depositi di origine industriale costituenti la discarica

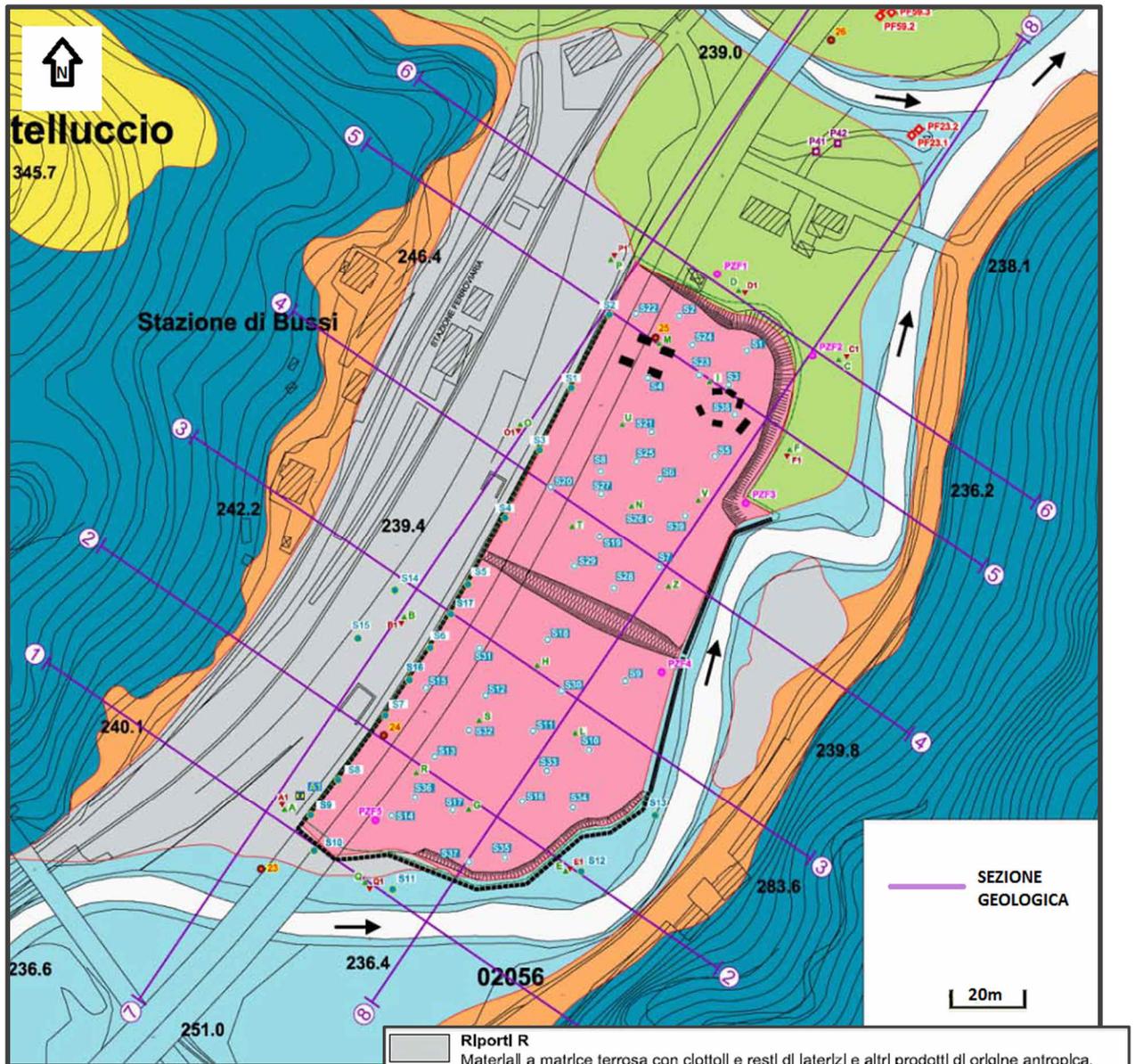


Figura 8: carta geologica dell'area presso la discarica con la traccia delle sezioni visibili in Figura 9 (Montana, 2012).

	Riporti R Materiali a matrice terrosa con clottoli e resti di laterizi e altri prodotti di origine antropica.
	Discarica D Materiali costituenti la discarica abusiva
	Paleosuolo P Terreno a matrice limoso-sabbiosa di colore marrone bruno scuro e residui di apparati radicali.
	Complesso macroclastico superiore A Depositi fluviali costituiti da ciottoli, ghiaie e sabbie (macroclastiti) con tenore variabile in matrice sabbioso-limoso, intercalate a depositi fini di argine o di esondazione a litologia limo-sabbiosa o sabbiosa. Si ritiene che la K media rappresentativa del complesso sia 1×10^{-4} m/s, tipica di un acquifero ad alta permeabilità.
	Complesso limoso-argilloso F Depositi palustri e lacustri composti da limi, limi argillosi e subordinati limi sabbiosi, con occasionali intercalazioni sabbiose o sabbioso limose. Il complesso è da considerarsi un acquifero a media permeabilità, con coefficiente di permeabilità media rappresentativa pari a $k = 1 \times 10^{-6}$ m/s.
	Complesso travertino T Travertini (<i>calcareous tufa</i>) in facies fitoclastica e fitoermale formati per risalita di acque sulfuree fredde all'interno di un sistema fluviale. Il coefficiente di permeabilità di riferimento è pari a 2×10^{-4} m/s, tipica di un acquifero per fratturazione e carsismo a buona permeabilità.
	Complesso macroclastico e detritico inferiore C Depositi di conoidi, detrito di versante, frane. Costituito da clottoli, ghiaie in subordinata matrice sabbiosa talvolta con episodi più fini. Costituisce un acquifero poroso a permeabilità da molto alta a elevata con coefficiente di permeabilità medio pari a 5×10^{-4} m/s.
	Substrato roccioso-Bedrock S Calcarei detritici, calcareniti fratturate e carsificate a luoghi intensamente fratturate. Coefficiente di permeabilità K pari a $3,8 \times 10^{-5}$ m/s caratteristico di un acquifero fratturato e potenzialmente carsificabile a permeabilità media.

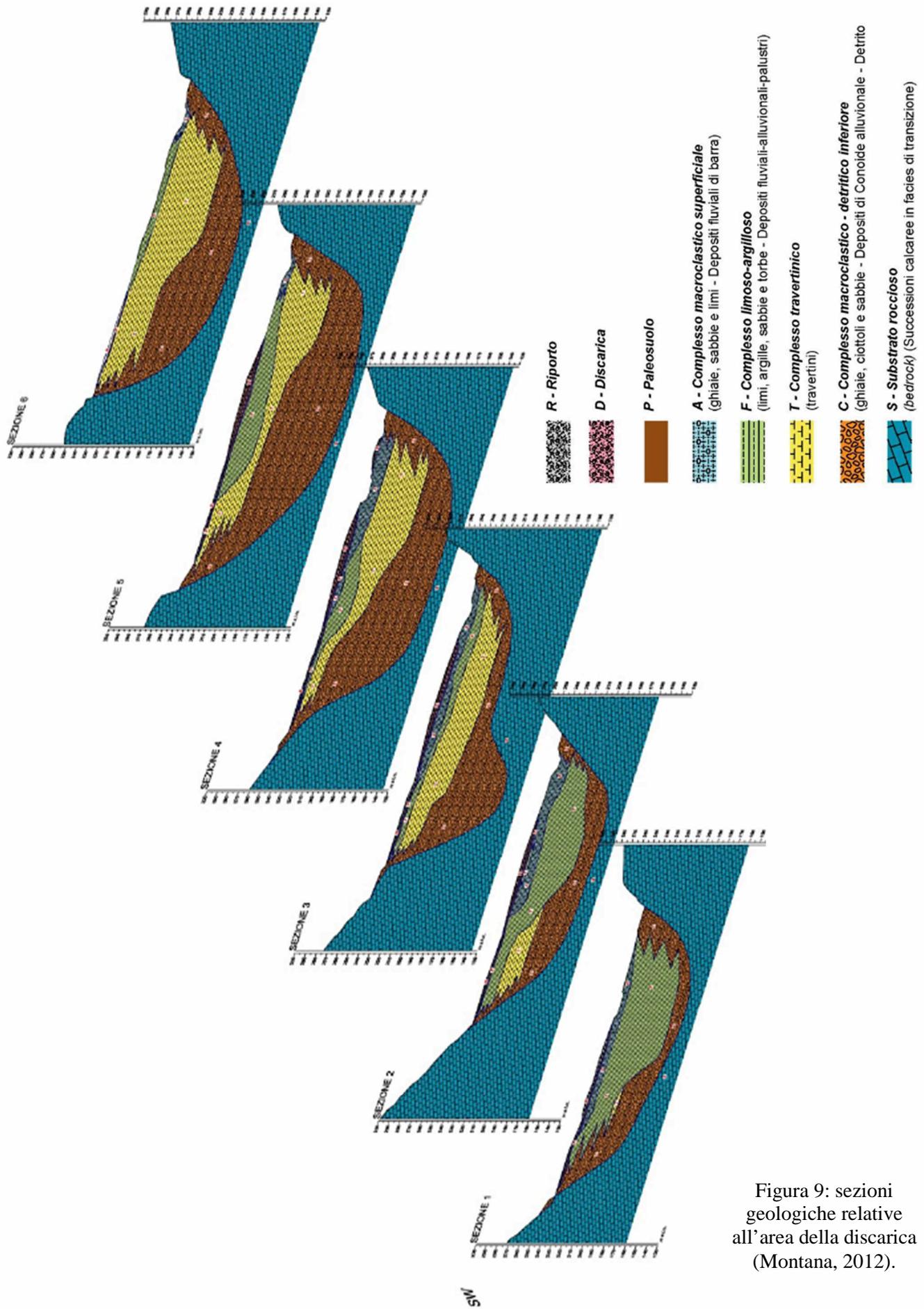


Figura 9: sezioni geologiche relative all'area della discarica (Montana, 2012).

5. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

L'area di interesse è caratterizzata da fenomeni tettonici, anche recenti, i quali hanno coinvolto l'Appennino centrale a partire dal Pleistocene inferiore-medio.

I rilievi sono prevalentemente disposti secondo la direzione N/NW-S/SE e circondano bacini colmati da depositi continentali quaternari, limitati in corrispondenza di alcune faglie.

Il reticolo idrografico si dirama secondo un *pattern* angolare (Figura 10), dovuto all'allineamento dei principali corsi d'acqua con diversi elementi strutturali (*sensu* Coltorti & Dramis in cap. IV di Centamore *et al.*, 2006).

La Dorsale del Morrone è limitata a ovest da una struttura di faglie dirette che originano uno scalino a metà versante, ovvero il Bacino di Sulmona, che si estende in direzione nord, verso l'alta valle del Tirino. La sua componente settentrionale è rappresentata dalla presenza di depositi alluvionali terrazzati, originati dall'incisione dei fiumi Sagittario e Aterno (*sensu* Coltorti & Dramis in cap. IV di Centamore *et al.*, 2006).

Invece, la parte a nord delle Gole di Popoli presenta una notevole diffusione di deformazioni gravitative profonde e frane estese, che interessano anche i terreni pelitici e arenacei in località Tocco a Casauria (PE) e sui versanti rivolti verso la valle del fiume Pescara (*sensu* Coltorti & Dramis in cap. IV di Centamore *et al.*, 2006).

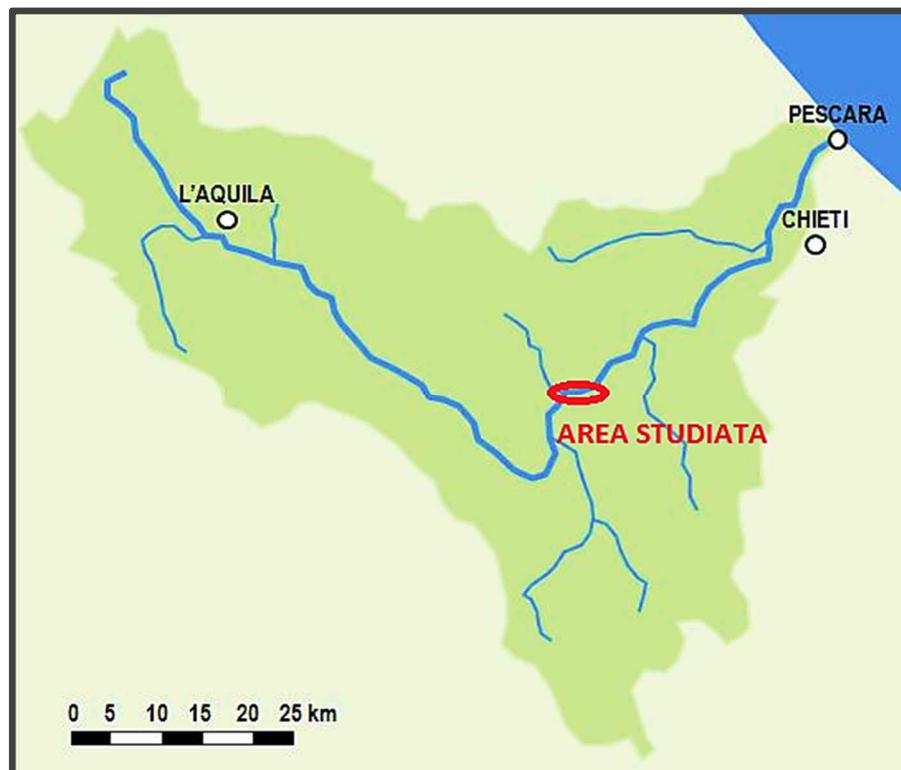


Figura 10: bacino idrografico del fiume Pescara.

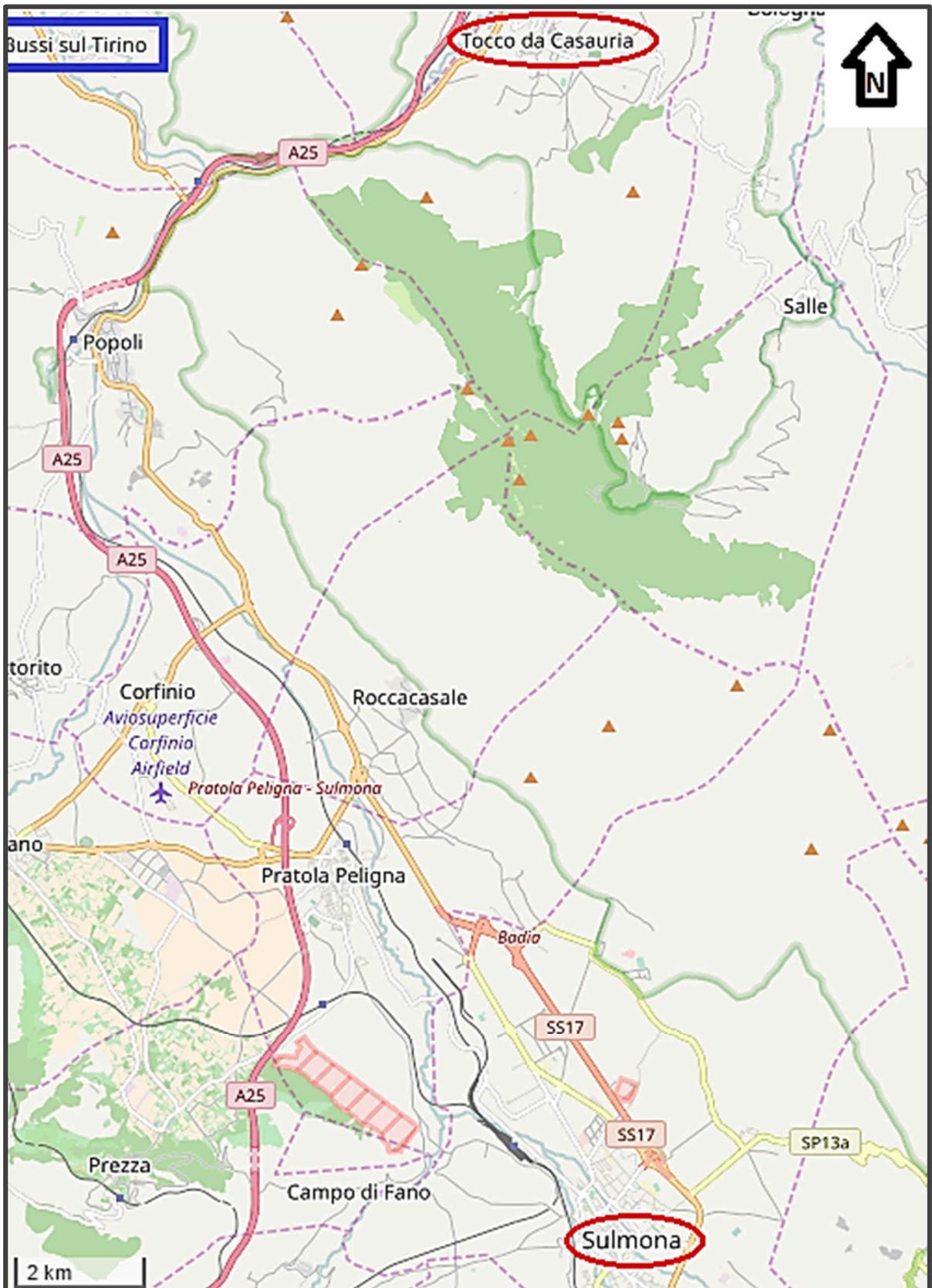


Figura 11: localizzazione di Tocco a Casauria e di Sulmona rispetto a Bussi sul Tirino, citate nel capitolo 5 (OSM, 2017).

5.1 La bassa valle del fiume Tirino

La valle si è sviluppata in direzione N/NW-S/SE ed è circondata da diversi rilievi che oltrepassano i 1000 m di quota, fino a giungere alla quota di 1405 m s.l.m. del Monte Picca, sito a sinistra del fiume Tirino (Figura 7 in Capitolo 4.2).

Presso l'areale di studio, comprendente depositi lacustri e fluviali e falde detritiche di versante, sono osservabili lembi isolati di paleosuperfici terrazzate su entrambi i lati della valle, tra l'abitato di Bussi sul Tirino ed il luogo occupato dallo stabilimento industriale (Petitta & Brunetti, 2007).



Figura 12: foto aerea con evidenziate la discarica Tre Monti, il Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo ed i fiumi Tirino e Pescara. (Regione Abruzzo, 2016)

6. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

In conseguenza all'assetto geologico locale, l'idrogeologia dell'area risulta essere complessa, considerato che le Gole di Popoli si trovano al limite di Unità tettono-stratigrafiche caratterizzate da peculiari circolazioni idriche.

6.1 Acquiferi a porosità per frattura e/o carsismo

A nord-ovest si riscontra l'acquifero dei Monti del Gran Sasso–Sirente, alloggiato in successioni carbonatiche mesozoiche e limitato da discontinuità tettoniche e da depositi argilloso-arenaceo-marnosi poco permeabili. Ad est è circoscritto dall'accavallamento della serie carbonatica sul “Flysch della Laga” tramite il sovrascorrimento del Gran Sasso, che consiste in un limite di tamponamento (soglia di permeabilità sottoposta) con interscambi nulli o trascurabili con gli acquiferi circostanti (Habetswallner, 2008).

Nell'area di studio si constata la presenza di importanti emergenze d'acqua (Figura 13), sia puntuali che lineari (sorgenti Basso Tirino, sorgenti S. Calisto, sorgenti Capo Pescara; Petitta & Tallini, 2002), prodotte dal contrasto per soglia di permeabilità sottoposta, provocato dalla sovrapposizione dei termini carbonatici meso-cenozoici ad elevata permeabilità secondaria e riconducibili all'Unità tettono-stratigrafica del Gran Sasso sulle componenti terrigeno-silicoclastiche facenti parte dell'Unità del Morrone (Petitta & Brunetti, 2007).

L'acquifero dei monti del Gran Sasso-Sirente può essere diviso in due corpi idrici sotterranei secondari, uno relativo ai “Monti del Gran Sasso” e uno al “Monte Sirente” (Habetswallner, 2008). I recapiti si trovano principalmente ai limiti dei corpi carbonatici e constano di sorgenti prevalentemente captate ad uso potabile; nello specifico, questo acquifero alimenta le sorgenti del Tirino (Capo d'Acqua del Tirino, Capestrano, Medio Tirino e Basso Tirino con una portata complessiva di circa 13,4 m³/s).

Tuttavia, le acque della falda alla base del massiccio carbonatico, prima di giungere nel Tirino e provocare aumenti di portata lungo il corso d'acqua, travasano nei depositi fluvio lacustri della piana del Tirino (Habetswallner, 2008).

Il corpo idrico secondario di Monte Sirente rappresenta la parte meridionale del massiccio. Questo acquifero alimenta prevalentemente il fiume Aterno, a monte di Popoli, e presenta perdite diffuse nella coltre fluvio-lacustre della piana di Sulmona e in corrispondenza delle sorgenti S. Liberata-Capo Pescara, con una portata di travaso di 6,3 m³/s (Habetswallner, 2008).

Il corpo idrico all'interno del massiccio del Morrone è, invece, caratterizzato dai depositi dell'Unità di piattaforma carbonatica abruzzese esterna. Questo acquifero è ospitato all'interno di una dorsale carbonatica che si propaga in direzione NW-SE ed è limitato da alcune discontinuità tettoniche e da depositi argilloso-arenaceo-marnosi poco permeabili. La direzione preferenziale della falda di base è verso il settore nord-occidentale.

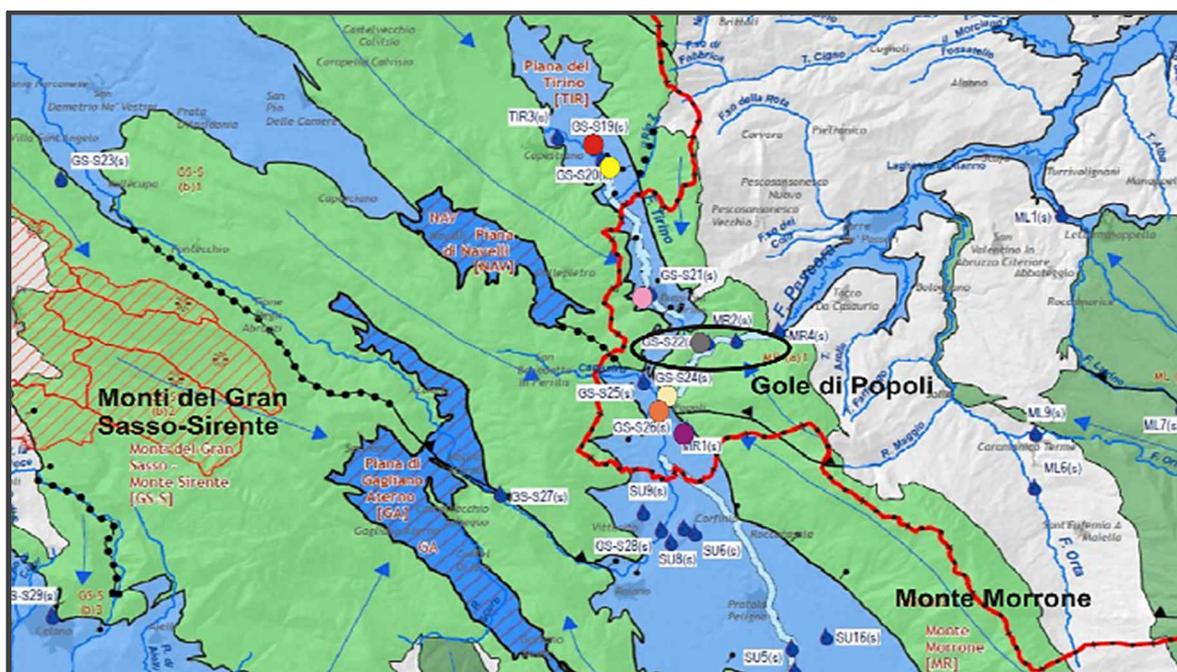
Analogamente al precedente acquifero, il massiccio può essere ripartito in due corpi idrici secondari: Monte Rotondo e Monte Morrone s.s.. Il primo trova recapito nella parte inferiore del complesso, caratterizzato dalle Gole di Popoli, provocando incrementi di portata del fiume Pescara dell'ordine di 0,96 m³/s, prima dell'affluenza del fiume Tirino, mentre

all'uscita delle Gole (presso il salto ENEL della centrale idroelettrica) sono stati determinati incrementi dell'ordine di $0,47 \text{ m}^3/\text{s}$ (Habetswallner, 2008).

Invece il secondo corpo idrico coincide con la porzione centro-meridionale del massiccio e trova recapito sul margine nord-occidentale del corpo idrico, originando la sorgente Giardino, nei pressi di Popoli. Anche se questa unità è in parte distinta da quella di Monte Rotondo, notevoli aliquote d'acqua defluiscono verso la parte più bassa della struttura, rappresentata dalle Gole di Popoli. Inoltre, la falda del Morrone riceve un importante quantitativo d'acqua dalla piana di Sulmona, attraverso travasi idrici sotterranei.

Le Gole di Popoli risultano quindi essere il recapito di massicce quantità d'acqua, anche superiori ai $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (Habetswallner, 2008), partecipando ad una certamente non trascurabile alimentazione-diluizione del deflusso dei depositi di fondovalle.

In sintesi, le Gole di Popoli si trovano all'interno della struttura idrica del Morrone ma le acque provengono da altre strutture (Gran Sasso e, in misura inferiore, piana di Sulmona), perciò queste fungono da asse primario di drenaggio dei sopraccitati acquiferi.



- Sorgente Capo d'Acqua del Tirino
- Sorgente S. Liberata e Capo Pescara
- Sorgente Alto Tirino
- Sorgente Giardino
- Sorgente Medio Tirino
- Acquiferi in depositi fluvio-lacustri
- Sorgente Basso Tirino
- Acquiferi in calcari e calcari marnosi
- Sorgente S. Calisto

Figura 13: dettaglio della carta idrogeologica della Regione Abruzzo (Habetswallner, 2008) e ubicazione delle sorgenti di maggiore interesse per l'area delle Gole di Popoli. Cerchiata in nero l'area delle Gole di Popoli.

6.2 Acquiferi a porosità per frattura ed interstizi.

Questi acquiferi sono inseriti nei sedimenti di fondovalle del fiume Pescara e del basso Tirino e sono composti sia da depositi fluvio-lacustri o detritici grossolani sia da depositi travertinici (permeabili principalmente per porosità secondaria e carsismo).

A valle dell'affluenza del fiume Tirino nel Pescara, la successione lascia spazio a un potente banco di travertino, seguito da depositi grossolani in parte cementati (Di Molfetta & Fracassi, 2008).

In corrispondenza dello stabilimento, nella bassa valle del Tirino, sono presenti due falde: una superficiale, non confinata, ospitata nei depositi ghiaiosi sabbiosi superficiali che, verso valle, evolvono in limi sabbiosi; una più profonda, semiconfinata, presente nei depositi siti alla profondità di circa 30 m dal piano campagna. Le due falde sono separate da un acquitardo di limi lacustri, continuo sotto lo stabilimento, e caratterizzato da spessori compresi tra 30 m e 10 m (Di Molfetta & Fracassi, 2008). Considerata la variabilità di spessore e granulometria dell'intervallo limoso, è presumibile una connessione idraulica tra le due falde.

Presso la congiunzione del fiume Tirino col fiume Pescara, sono sempre presenti due falde diverse: la più profonda è collocata nei travertini, la più superficiale è sostenuta invece da un livello di limi che tende a chiudersi verso valle, dove si può osservare un unico corpo idrico in cui confluiscono le due falde (Di Molfetta & Fracassi, 2008).

Inoltre, si può constatare un graduale incremento del gradiente idraulico, procedendo verso valle, al termine della valle del Tirino ed in corrispondenza della confluenza del Tirino nel fiume Pescara, in conseguenza sia dell'esistenza, a valle idrogeologica, del corpo di travertino ad elevata permeabilità dovuta a fratturazione e carsismo che genera una sorta di cascata della falda superficiale, sia, a monte idrogeologico, di una soglia di permeabilità rappresentata da limi sabbiosi poco permeabili.

L'area comprendente la discarica Tre Monti presenta un corpo limoso-argilloso, spesso fino a 30 m (aquitardo), poggiante sui travertini. Questi ultimi, aumentando di spessore verso valle, lo sostituiscono completamente in prossimità della confluenza col Tirino, raggiungendo spessori di oltre 70 m, a partire dal basamento carbonatico, fino alla superficie e formando un unico corpo ad elevata permeabilità che si protende per circa 1500 m attraverso la valle.

Fra la discarica e il campo pozzi di Colle Sant'Angelo il travertino comincia ad assottigliarsi fino a scomparire. Le ghiaie del basamento, invece, rivestono anche i fianchi della valle con facies di conoide e falda detritica costituendo un corpo sottoposto e giustapposto in senso trasversale alla valle agli altri termini del colmamento sedimentario (Cinque, 2009).

Nell'areale in analisi, a valle della discarica abusiva Tre Monti, si registra un gradiente idraulico crescente (circa 26‰), associato ad un approfondimento della falda in corrispondenza del passaggio dai limi ai travertini: le quote piezometriche evolvono, infatti, dai 235 m s.l.m., nei pressi della discarica, a 222 m s.l.m., in prossimità della congiunzione col fiume Tirino (Poillucci *et al.*, 2007).

Invece, nel tratto a monte dell'affluenza del Tirino, il gradiente longitudinale della falda è vicino al 2‰, mentre, tra lo sbarramento ENEL ed il campo pozzi è approssimativamente del 7‰ (Cinque, 2009).

L'area impegnata dal campo pozzi è caratterizzata dall'assenza di travertino compatto e mostra alternanza di corpi detritici e ghiaiosi alluvionali, verosimilmente in contatto laterale con i travertini, presenti a monte (Poillucci *et al.*, 2007), e corpi limoso-argillosi.

Più in particolare, i pozzi situati a destra del Pescara captano una falda compresa all'interno di ghiaie e sabbie calcaree che poggiano su calcari fratturati: si ipotizza la presenza di una falda isolata dal subalveo del fiume Pescara, ad opera di uno strato di depositi limoso-torbosi (Di Molfetta & Fracassi, 2008).

Diversamente, i pozzi collocati a sinistra del Pescara intercettano un acquifero composto da detriti calcarei, talvolta con intercalati sottili lenti limose di spessore decimetrico, poggianti su un substrato di marne, alla profondità di 30 m dal piano campagna; questo acquifero risulta essere connesso con il subalveo del fiume Pescara (Di Molfetta & Fracassi, 2008).

6.3 Geochimica delle acque

Considerati gli inquadramenti geologici ed idrogeologici svolti, è opportuno classificare le acque da un punto di vista geochimico.

Generalmente le acque dell'area di studio possono essere classificate come bicarbonato alcalino-terrose.

Nello specifico, le acque legate al massiccio del Gran Sasso, che alimentano le sorgenti del fiume Tirino e, parzialmente, anche quelle di Capo Pescara (Popoli), risultano essere chimicamente omogenee, ricche dello ione calcio (Petitta & Tallini, 2002).

Inoltre, queste acque sono caratterizzate da valori relativamente importanti di ione solfato (dell'ordine di 20 ppm) e da un rapporto Ca/SO₄ approssimativamente costante (Figura 14). Questo denota un apporto di acque circolanti nel substrato evaporitico triassico (Petitta & Tallini, 2002).

Per approfondire la geochimica delle acque si rimanda al lavoro di Tesi di Chiarini V. del 2012; nell'occasione sono stati svolti accurati studi geochimici in quest'area.

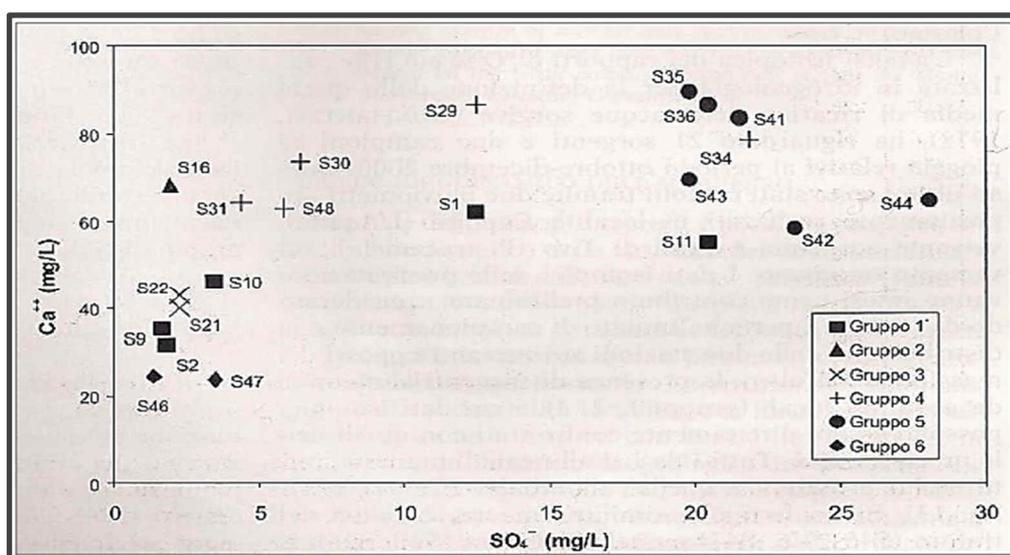


Figura 14: relazione tra ione calcio e ione solfato nelle acque del sistema idrico del massiccio del Gran Sasso. Il gruppo 5 comprende le sorgenti del Tirino e di Capo Pescara (Petitta & Tallini, 2002).

7. GESTIONE DELLO STABILIMENTO

Agli inizi del '900, presso l'insediamento di Bussi Officine, si edificò il primo polo industriale chimico in Italia che vantava un impianto di elettrolisi di cloruro di sodio, dedicato alla produzione di soda caustica e perfezionato al fine di produrre ipoclorito di sodio e acido cloridrico, a partire da cloro gassoso (Di Molfetta & Fracassi, 2008); la proprietà dello stabilimento, inizialmente, era della società Franco-Svizzera "Elettrochimica Volta".

Nel 1907 si introdusse la lavorazione dell'alluminio mediante elettrolisi, per la prima volta in Italia.

Nel corso della prima guerra mondiale lo stabilimento si specializzò nella produzione di ferro-silicio (indispensabile per corazzare le navi), clorati (per realizzare esplosivi), fosgene (per produrre gas asfissianti), ioduro e cloruro di benzile (utili come lacrimogeni).

Nell'immediato dopoguerra, lo stabilimento si dedicò primariamente alla produzione di idrogeno e azoto.

Tra il 1928 e il 1931, la Montecatini rilevò le aziende che si erano sviluppate progressivamente nell'area di Bussi (Di Molfetta & Fracassi, 2008).

Mentre si svolgeva la seconda guerra mondiale, lo stabilimento subì una riconversione e implementò la produzione dell'Iprite (tioetere di cloroetano), un gas vescicante avente funzione di arma chimica durante il conflitto.

Durante l'immediato dopoguerra, si verificò un breve periodo di stasi, per tornare in seguito a pieno regime a partire dagli anni '60, quando si iniziò a produrre clorometani, aventi prevalentemente funzione di gas refrigeranti.

In seguito a questa nuova fase industriale, le peci clorate, ovvero i residui pesanti del processo di distillazione dei clorometani, furono scaricate direttamente nel fiume Tirino, secondo quanto sostenuto e provato durante la successiva inchiesta giudiziaria, in quantità fino a 1 tonnellata al giorno.

A partire dal 1963, la Montecatini iniziò a servirsi della discarica Tre Monti per lo smaltimento dei residui pesanti. La discarica consisteva in un interrimento ricavato nella zona golenale del fiume Pescara (Francani *et al.*, 2010).

Nel 1966, in seguito alla fusione tra Montecatini ed Edison (successivamente abbreviato in Montedison), presso lo stabilimento di Bussi Officine si intraprese la produzione di antidetonanti a base di piombo tetraetile per le benzine.

Nel 1971 la produzione di rifiuti liquidi dello stabilimento raggiunse i 65.000 m³ orari e provocò lo sversamento di quantitativi di piombo, quantificabili in 1,5 - 3 Kg ogni ora, direttamente nel fiume Tirino.

La quantità di piombo sversata aumentò negli anni successivi, passando a 2 - 4,1 kg/ora nel 1972 e aumentando ulteriormente a 2,75 - 8,2 kg/ora nel 1973 (Colombo, 2009). Inoltre, si è scoperto che nel 1979 venivano scaricati direttamente in fogna quantitativi di mercurio pari a 200 g al giorno.

Montedison ha operato fino al 1980 nello stabilimento e su tutte le aree esterne.

Il 31 dicembre 1980 Montedison cedette il ramo d'azienda "prodotti per l'industria chimica" alla propria controllata Ausimont S.p.A., che entrò in possesso del sito di Bussi e delle aree esterne, compresa la discarica abusiva sul fiume Pescara (Santamaria & Bolognesi, 2007).

Nel corso degli anni '80, è continuata la lavorazione di soda caustica, ipoclorito di sodio, acqua ossigenata, clorometani, acido cloridrico, perborato di sodio e cloruro di ammonio, ed incrementata la produzione di antidetonanti per le benzine (Di Molfetta & Fracassi, 2008).

Solo negli anni '80 fu ottenuta l'autorizzazione per due discariche dello stabilimento di Bussi, collocate a monte lungo la valle del Tirino, in sinistra idrografica, dichiarando che sarebbero state utilizzate per depositare materiali inerti provenienti da demolizioni e scavi e per alcuni rifiuti speciali derivanti dai processi produttivi. Tuttavia, attraverso indagini commissionate da Solvay S.p.A. (che ha recentemente acquistato il sito), è emersa la presenza di mercurio, piombo e, in misura minore, di composti organici clorurati e derivati della produzione di clorometani, non compresi nelle autorizzazioni concesse (ISPRA, 2009).

Nel 1989, Montefluos (abbreviazione di Montedison Fluorurati) implementò un impianto per produrre acido cloridrico a partire dal tetracloruro di carbonio grezzo, mentre nel 1990 terminò la produzione di piombo tetraetile.

Il 18 dicembre 1991 Montefluos e Ausimont si unirono in un'unica società.

Tra il 1992 e il 1994, esternamente all'area, venne realizzata la Turbogas-Edison, per produrre energia elettrica tramite gas metano, la quale divenne proprietaria dell'area occupata.

Dopo il 1993 Montedison passò sotto il controllo indiretto delle banche creditrici che predisposero la ristrutturazione dell'azienda.

Solamente a partire dal 1997 è possibile reperire informazioni riguardo la destinazione dei rifiuti; infatti, tra il 1997 e il 2002, Ausimont ha ammesso lo smaltimento di residui contenenti mercurio e clorurati.

Nel 2001, Ausimont ha attivato procedure di bonifica per la messa in sicurezza dell'area, a causa dell'inquinamento prodotto dalla propria attività, occupandosi però dei terreni e trascurando la falda.

Nel Maggio 2002, secondo un accordo contrattuale stipulato con Montedison S.p.A. e Longside International S.A. (socio di minoranza al 20%), Solvay S.p.A. assunse il controllo di Ausimont.

La proprietà del sito, incluso lo stabilimento di Bussi, passò così a Solvay Solexis S.p.A., tuttora proprietaria del sito in questione (Santamaria & Bolognesi, 2007).

Negli anni compresi tra il 2002 e il 2005 Solvay ha smaltito in maniera controllata rifiuti con mercurio e clorurati provenienti dalla propria produzione.

Solamente nel 2007 è cessata la produzione di clorometani.

7.1 Il disastro ambientale

Nel 2004 Solvay commissionò diverse indagini per la caratterizzazione ambientale, riscontrando un elevato livello di inquinamento nelle aree dello stabilimento. La contaminazione era dovuta principalmente al rilascio diretto nel terreno di inquinanti e all'utilizzo di rifiuti come materiali di riporto (ISPRA, 2009).

Più in dettaglio, in tre aree diverse del sito industriale è stato possibile correlare l'inquinamento al tipo di produzione industriale.

A nord, in corrispondenza dell'impianto per la produzione di antidetonanti per le benzine, si riscontrarono elevate concentrazioni di piombo, piombo tetraetile e piombo tetrametile.

A ovest, in prossimità dell'impianto cloro-soda, si rilevarono alti valori di mercurio, utilizzato nei processi produttivi.

Invece, presso il centro dello stabilimento, dove era ospitato l'impianto adibito alla lavorazione dei clorometani, sono state misurate elevate concentrazioni di composti clorurati e di mercurio, così come nella restante parte dello stabilimento (ISPRA, 2009).

Fu inoltre necessario caratterizzare l'acquifero superficiale al di sotto delle discariche poste a nord dello stabilimento, il quale ha mostrato la presenza di mercurio, piombo, composti organici clorurati e cromo totale ed esavalente.

In aggiunta, anche l'acquifero profondo risultò essere interessato da composti clorurati, anche se in concentrazioni molto inferiori rispetto a quello superficiale.

In seguito alle caratterizzazioni, svoltesi dal 2004 al 2007, Solvay posizionò due barriere idrauliche di emergenza: la prima, areale, realizzata nel 2005, relativa all'acquifero superficiale, costituita da pozzi localizzati all'interno dello stabilimento, successivamente potenziata fino al raggiungimento di 16 pozzi (nell'area dell'impianto dei clorometani ed in sinistra e destra Tirino); la seconda, lineare, composta da quattro pozzi di emungimento e riferita all'acquifero profondo, realizzata nel 2008 (ISPRA, 2009).

Invece, per quanto riguarda la discarica Tre Monti, sulla sponda sinistra del Pescara, a monte della confluenza col Tirino, sono stati riscontrati all'interno della stessa esacloroetano, percloroetilene e altri composti organici clorurati, mescolati al terreno, che non aveva nessun tipo di impermeabilizzazione. Si stima che la massa dei terreni contaminati abbia un volume di 138.600 m³ e raggiunga in media uno spessore di 3,7 metri (ISPRA, 2009).

Il 19 dicembre 2014 i vertici di Montedison (ora Edison) furono assolti in primo grado dalla Corte d'Assise di Chieti dall'accusa di aver avvelenato le falde acquifere e dal reato di disastro ambientale, derubricato in colposo e, quindi, prescritto.

Tuttavia, il 17/02/2017, in secondo grado, la Corte d'Assise de L'Aquila ha ribaltato la sentenza, condannando dieci persone tra i 2 ed i 3 anni, per disastro ambientale colposo aggravato e avvelenamento di acque colposo aggravato; reati non soggetti a prescrizione.



Figura 15: foto aerea del sito della discarica.

7.1 La messa in sicurezza provvisoria

Durante il 2010 è stato approvato e realizzato un progetto per il *capping* della discarica (Figura 16), in modo da provvedere alla messa in sicurezza provvisoria, in attesa che venissero accertate le responsabilità del disastro.

L'opera è stata realizzata attraverso il posizionamento di un geotessile non tessuto, collocato direttamente sul materiale in posto, con successiva regolarizzazione del terreno tramite materiale di riporto.

Al di sopra è stato posizionato un geocomposito drenante, per intercettare i possibili gas provenienti dal terreno sottostante, collegato con l'esterno mediante tubi microfessurati.

L'isolamento è stato conseguito attraverso la messa in posto di una barriera, superiormente al geocomposito, realizzata con una geomembrana in HDPE di 1,5 mm.

A completamento della copertura è stato collocato uno strato drenante di ghiaia, previa stesura di un geosintetico antipunzonamento (Napoleoni *et al.*, 2010).

Lo scopo dell'opera è bloccare l'infiltrazione di acqua nel terreno contaminato ed impedire un ulteriore trasporto di inquinanti, tuttavia si tratta di una copertura solamente superficiale, mentre interventi di bonifica del terreno e di impermeabilizzazione profonda non sono stati svolti ad eccezione di una palancoata sospesa in metallo (Figura 17), immersa per una ventina di metri, che protegge il corpo dei rifiuti dalla ricarica laterale da parte del Pescara.

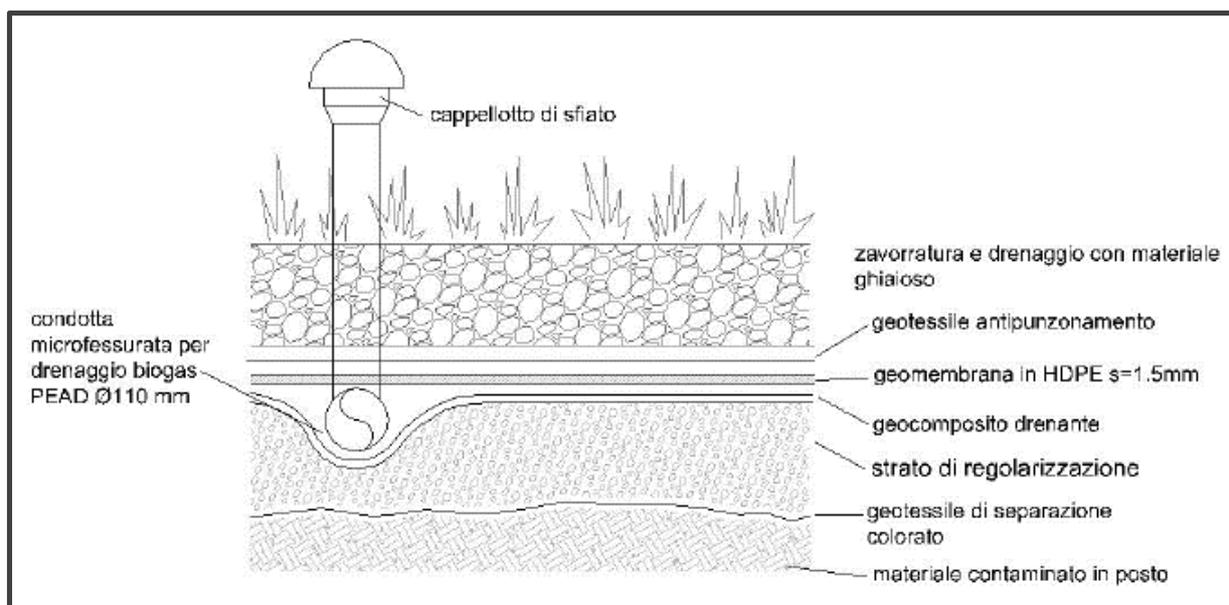


Figura 16: schema del pacchetto di copertura piano posto in opera.

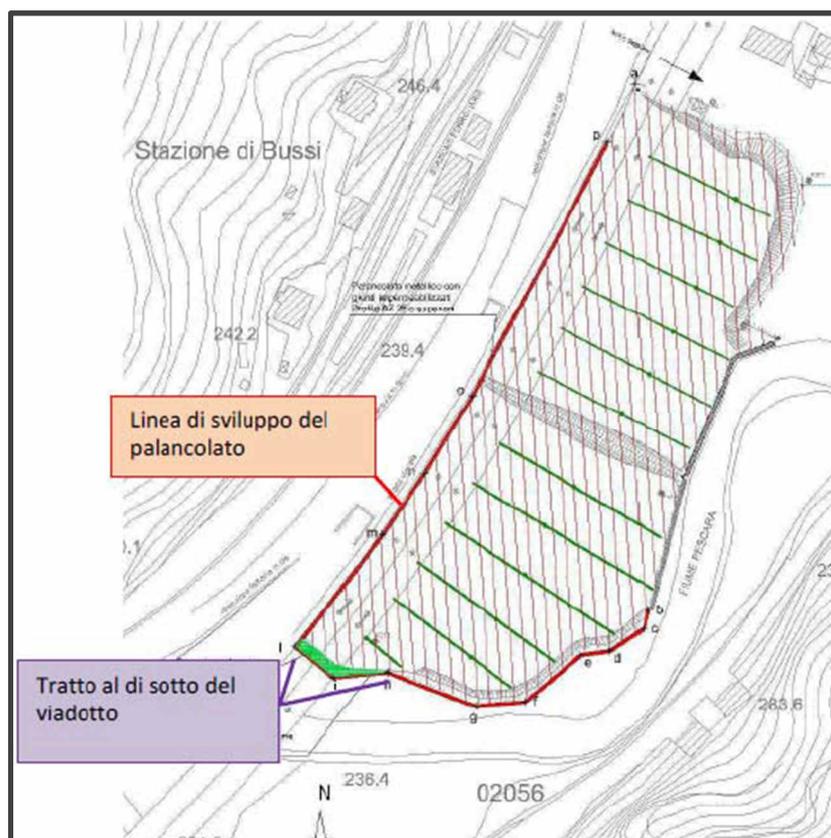


Figura 17: tracciato del palancolato metallico (in rosso).

7.2 Il campo pozzi di Colle Sant'Angelo

Nel corso degli anni '80, quindi in concomitanza degli sversamenti industriali incontrollati, ha luogo la nascita del campo pozzi di Colle Sant'Angelo, gestito da ACA (Azienda Comprensoriale Acquedottistica), a 2,2 km a valle di Bussi Officine e comprendente 8 pozzi, di cui 5 situati in sinistra Pescara e 3 in destra idrografica.

I pozzi hanno diametro tra 400 mm e 500 mm e raggiungono una profondità compresa tra 32,10 m e 62,80 m.

Eccetto il sesto pozzo, che filtra anche la falda superficiale, i restanti filtrano prevalentemente la falda profonda.

Solo nel 1986 si riscontra la prima evidenza di una possibile contaminazione a carico del campo pozzi (presunta, non documentata da dati), grazie a una relazione ambientale-geologica, effettuata dal Geol. Molinari, sotto incarico della Montefluos, che riporta la presenza nella zona di discariche e inquinamenti (Santamaria & Bolognesi, 2007).

In aggiunta una relazione analoga viene redatta nel 1992, anno in cui si accerta per la prima volta l'inquinamento al campo pozzi di Colle Sant'Angelo relativamente alla presenza di sostanze organo-alogenate totali pari a 16 µg/L, valore comunque inferiore ai limiti di legge di quel tempo, corrispondente a 30 µg/L (DPR 236/88).

Successivamente il 25/12/2003, entrano in vigore nuovi limiti di legge per la potabilità delle acque, che abbassano il limite a 10 µg/L, per quanto riguarda la sommatoria di tetracloroetilene e tricloroetilene (D.lgs. 31/2001).

Ulteriori analisi al campo pozzi sono effettuate nel 1997, 2000, 2002 e 2004, mostrando la presenza costante di sostanze organoalogenate. In particolare, tra il 2004 e il 2007 si misura la concentrazione massima di 12,8 µg/L di tricloroetilene e tetracloroetilene, superiore ai limiti di legge (Colombo, 2009).

Nel 2004 ARTA Abruzzo, nell'ambito di un monitoraggio delle acque del fiume Pescara, conferma la presenza di inquinamento, estesa a tutti i pozzi del campo. Inoltre, si rileva la presenza di clorurati in fontane pubbliche dell'acquedotto, comunque in concentrazioni inferiori a quelle stabilite per legge.

Infine, preso atto della situazione, nel 2007, il campo pozzi di Colle Sant'Angelo viene chiuso.

È difficile ricostruire l'inquinamento negli anni precedenti a causa della mancanza di campionamenti e dell'agire indisturbato degli enti che hanno progressivamente occupato lo stabilimento. Basti pensare che, già a partire dagli anni '70, studi sui tessuti dei pesci e sui capelli umani hanno mostrato percentuali significative di mercurio nei pesci studiati nell'area della foce del Pescara e nei capelli dei consumatori di pesce di quelle zone (Caracciolo, 1972).

Nel 1981 sono state inoltre misurate concentrazioni di mercurio nei sedimenti del fiume Pescara pari a 7,1 ppm e 0,34 ppb per quanto riguarda le acque; il piombo, invece, è stato riscontrato in concentrazioni di 24,5 ppb nelle acque e di 672 ppm nei sedimenti (Colombo, 2009).

8. GLI IDROCARBURI CLORURATI

Gli idrocarburi clorurati sono composti di sintesi, derivanti da idrocarburi, con l'aggiunta di un alogeno quale il cloro (Cl). Tali sostanze sono quindi costituite da atomi di carbonio, idrogeno e cloro.

Gli idrocarburi alifatici (a catena aperta) di partenza si suddividono in due categorie principali: gli alcani e gli alcheni. I primi, la cui formula di struttura generica è C_nH_{2n+2} , sono caratterizzati dalla presenza di legami covalenti semplici (saturi) fra atomi di carbonio, mentre i secondi, la cui formula di struttura generica è C_nH_{2n} , sono caratterizzati dalla presenza di doppi legami (insaturi).

Gli alcani clorurati più significativi sono:

- Metani clorurati, derivati dal metano (CH_4);
- Etani clorurati, derivati dall'etano (C_2H_6);
- Propani clorurati, derivati dal propano (C_3H_8).

Mentre, alcheni clorurati significativi sono i composti degli etileni clorurati, derivati da etilene (C_2H_4). Un elenco più dettagliato è presente in Tabella 2.

Le sigle adottate nella nomenclature sono basate sui termini inglesi dei composti.

La sostituzione di uno o più atomi di idrogeno con atomi di cloro determina la formazione, rispettivamente, degli alcani clorurati e degli alcheni clorurati.

Nella maggior parte dei casi, si tratta di sostanze dotate di un ottimo potere solvente, propellente e refrigerante.

Tutti i composti sono liquidi e più densi dell'acqua, ad eccezione di cloruro di vinile, cloroetano e del clorometano, che sono gassosi (il cloruro di vinile è poco più leggero dell'acqua).

Non hanno solubilità particolarmente elevate ma risultano assai importanti per le problematiche legate alla contaminazione, poiché i limiti di legge prevedono concentrazioni soglia nell'ordine dei $\mu g/L$.

Sono a bassa viscosità, inferiore a quella dell'acqua, e ciò ne facilita il movimento nel mezzo poroso.

Complessivamente hanno una certa tendenza a volatilizzare, ovvero a passare a condizioni gassose, caratteristica che estende le problematiche di contaminazione anche alla zona insatura ed amplifica le possibilità di incidenza di tali sostanze in problematiche sanitarie in aree a frequentazione indoor.

Tendono ad avere una particolare affinità per la sostanza organica, espressa da un elevato rapporto ottanolo/acqua. Il rapporto ottanolo/acqua (K_{ow}) è importante perché indica la tendenza di un prodotto chimico a ripartirsi nella fase organica o nella fase acquosa. Valori di K_{ow} bassi evidenziano che la solubilità in acqua è alta, che è basso il coefficiente di adsorbimento e basso il fattore di bioconcentrazione nella vita in acqua.

NOME	SIGLA	ORIGINE	UTILIZZO
ETILENI CLORURATI			
Tetracloroetilene	PCE	Sintesi chimica	Solvente
Tricloroetilene	TCE	Sintesi chimica, degradazione PCE	Solvente
1,2 Dicloroetilene (Cis e Trans)	1,2 DCE (<i>Cis e Trans</i>)	Sintesi chimica, degradazione PCE e TCE	Solvente
1,1 Dicloroetilene	1,1 DCE		
Cloruro di vinile	VC	Sintesi chimica, degradazione CAHs più complessi	Produzione PVC
ETANI CLORURATI			
1,1,1,2 Tetracloroetano	1,1,1,2 PCA	Sintesi chimica	Solvente
1,1,1,2 Tricloroetano	1,1,1,2 TCA	Sintesi chimica	Solvente
1,2 Dicloroetano	1,2 DCA	Sintesi chimica, degradazione 1,1,2 TCA	Solvente
1,1 Dicloroetano	1,1 DCA	Degradazione 1,2 TCA	
Cloroetano	CA	Degradazione di 1,1,2 TCA e 1,2 DCA	Refrigerante
METANI CLORURATI			
Tetraclorometano	CT	Sintesi chimica	Solvente, estintori del fuoco
Triclorometano	CF	Sintesi chimica, degradazione CT	Solvente, anestetico (cloroformio)
Diclorometano	DCM	Degradazione CT	Solvente
Clorometano	CM	Sintesi chimica, degradazione CT	Refrigerante
PROPANI CLORURATI			
1,2 Dicloropropano	1,2 DCP	Sintesi chimica	Solvente, smacchiatore, solvente per processi industriali, prodotti fitosanitari, produzione PCE

Tabella 2: nomenclatura, origine ed utilizzo dei principali idrocarburi clorurati.

8.1 Il Tetracloroetilene

Il tetracloroetilene (PCE) è un alogenuro organico. La sua struttura è assimilabile a quella di una molecola di etene i cui quattro atomi di idrogeno sono stati sostituiti da altrettanti atomi di cloro (Figura 18).

A temperatura ambiente si presenta come un liquido incolore dall'odore di cloro, più denso dell'acqua. È un composto nocivo per inalazione e pericoloso per l'ambiente (come molti alogenuri organici è scarsamente biodegradabile). Non è infiammabile.

Viene utilizzato nelle lavanderie a secco, come solvente per lo sgrassaggio dei metalli, nell'industria chimica e farmaceutica, nell'uso domestico.

In Italia, la legge considera i rifiuti contenenti tetracloroetilene come "rifiuti pericolosi", tali rifiuti non devono essere smaltiti in fognatura.

La CSC del PCE è pari a 1,1 µg/L (D.lgs. 152/06).

Nell'area di studio, il PCE è l'idrocarburo clorurato che è stato maggiormente rilevato, pertanto è stato il contaminante implementato nel modello numerico di trasporto.

8.2 Effetti del PCE sulla salute

I principali effetti neurotossici causati dall'esposizione umana cronica o sub-cronica al tetracloroetilene sono i disturbi della visione, della memoria visuospatiale e delle funzioni neuropsicologiche (per esempio il tempo di reazione).

Il deficit della visione dei colori è stato riportato in diversi studi occupazionali, ed un suo peggioramento negli anni successivi è stato osservato negli individui maggiormente esposti rispetto ai non esposti. Una riduzione del punteggio in vari test di valutazione della memoria visuospatiale, dal 4 al 30% secondo il test, è stata riportata da vari autori in soggetti adulti. Per di più, riguardo alle funzioni neuropsicologiche, si segnala un allungamento dei tempi di reazione del 10-20% nei lavoratori esposti rispetto a quelli non esposti (Guyton *et al.*, 2014).

Risultati analoghi a quelli ottenuti negli studi epidemiologici umani sono stati ottenuti negli studi sperimentali sugli animali di laboratorio. Anche le modificazioni istologiche, le variazioni dei livelli di RNA, di DNA e dei neurotrasmettitori osservate negli animali concordano con gli effetti neurocomportamentali conseguenti all'esposizione al tetracloroetilene negli esseri umani (Guyton *et al.*, 2014).

Inoltre, l'esposizione cronica al tetracloroetilene conduce ad un aumentato rischio di cancro, e pertanto il composto è stato classificato come possibile cancerogeno (IARC, 1995).

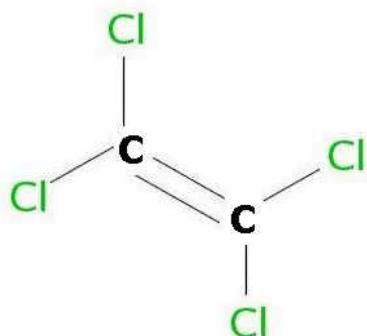


Figura 18: struttura molecolare del tetracloroetilene (PCE).

9. I MODELLI NUMERICI

Il modello di una falda acquifera è un utile strumento per caratterizzare le risorse idriche sotterranee, sia nella condizione di falda indisturbata, sia in presenza manufatti o di variazioni delle condizioni di alimentazione che modificano il naturale deflusso sotterraneo.

Un modello consente l'analisi di scenari di rischio e risanamento, finalizzati all'individuazione di possibili fonti di inquinamento, nonché di probabili bersagli e vie di trasporto di un contaminante venuto in contatto con la risorsa idrica sotterranea. Diversi sono i modelli applicabili nel campo delle acque sotterranee (McDonald & Harbaugh, 1989):

- modelli di tipo concettuale;
- modelli fisici (i.e., colonne e serbatoi di laboratorio);
- modelli basati sull'analogia tra flusso di corrente e flusso delle acque di falda.
- modelli matematici (numerici e analitici);

La modellazione numerica, a differenza delle altre metodologie adottabili, consente di considerare le reali caratteristiche geologiche ed idrogeologiche dell'acquifero analizzato e, soprattutto, permette di analizzare il problema tramite la soluzione delle equazioni che governano il fenomeno, quindi è l'unica forma di modellazione fisicamente basata.

La costruzione di un modello numerico presuppone la conoscenza di tutte le caratteristiche geologiche e idrogeologiche degli acquiferi oggetti di studio. I prerequisiti per la modellazione numerica di una risorsa idrica sotterranea comprendono la costruzione di un modello concettuale e, successivamente, di un modello matematico, che permettono di schematizzare il problema ai suoi tratti essenziali, senza per questo perdere le caratteristiche di rappresentatività e verosimiglianza con la realtà (McDonald & Harbaugh, 1989).

Un modello si pone, quindi, in ambito di gestione della risorsa idrica sotterranea, come un valido strumento per il monitoraggio della risorsa idrica sotterranea e per la previsione futura.

Costruire un modello che rappresenti in modo verosimile la realtà è molto difficile, perché la fase di modellazione prevede il trasferimento delle caratteristiche di un sistema reale complesso in un modello che può essere risolto utilizzando metodi numerici. Le maggiori difficoltà sono in genere riscontrate nella fase di costruzione del modello concettuale ed in modo particolare nella caratterizzazione geologica ed idrogeologica delle aree di studio. Più verosimile sarà il modello adottato, più attendibili risulteranno le previsioni sul comportamento del sistema reale (McDonald & Harbaugh, 1989).

Con l'ausilio di codici numerici implementati in appropriati software è possibile risolvere, in tutti i punti del dominio di interesse e nel tempo, le equazioni differenziali alle derivate parziali che governano il moto ed il trasporto all'interno degli acquiferi. Le caratteristiche geologiche del sottosuolo, quali ad esempio i contatti litologici, per le quali non può esistere una legge matematica che le rappresenti, sono ricostruite per interpolazione in tutto il dominio a partire da sondaggi puntuali (Bear, 1972).

Modflow è il codice di modellazione delle acque sotterranee più utilizzato al mondo e presenta un elevato grado di affidabilità. Sono stati sviluppati diversi software che consentono l'inserimento dei dati attraverso interfacce sempre più semplici e moderne (Bear, 1972).

Adottando il codice Modflow, è possibile caratterizzare due tipi di rappresentazioni modellistiche:

- un modello di flusso, che rappresenta il flusso d'acqua all'interno di un sistema di uno o più acquiferi, considerando portate e carichi piezometrici;
- un modello di trasporto, che ricostruisce il moto di uno o più inquinanti nel sistema, considerando vari processi (ad es. diffusione, convezione, dispersione idrodinamica, degradazione). Quest'ultimo avviene tramite il motore numerico MT3D-MS, implementato nel software.

Inoltre, le simulazioni del modello possono essere eseguite in due modalità differenti:

- regime transitorio, che ammette la possibilità di cambiamenti in direzione e modulo nel flusso; questo comporta un immagazzinamento variabile della riserva idrogeologica;
- regime stazionario, nel quale non avviene alcun cambiamento del flusso, quindi l'immagazzinamento resta costante;

9.1 Costruzione di un modello

Il processo di costruzione di un modello numerico prevede le seguenti fasi:

- raccolta ed interpretazione dei dati;
- comprensione del sistema naturale;
- costruzione del modello concettuale;
- scelta del modello numerico;
- calibrazione e validazione del modello;
- applicazione del modello;
- presentazione dei risultati.

9.1.1 Raccolta ed interpretazione dei dati

La fase iniziale di raccolta dati assume un ruolo fondamentale per previsioni attendibili. La qualità delle simulazioni, infatti, dipende soprattutto dalla validità del modello fisico e dalla natura dei dati di input. Minore influenza hanno, invece, il codice numerico, la discretizzazione spaziale e temporale scelta per la simulazione. Generalmente, i dati sperimentali non forniscono direttamente i parametri richiesti (ad es. la trasmissività o la ricarica) e queste grandezze devono essere estrapolate a partire dai dati di ingresso. (McDonald & Harbaugh, 1989).

Per lo sviluppo del presente lavoro i dati sono stati prevalentemente raccolti durante una campagna di indagine del 2012, quando sono state misurate diverse piezometrie e concentrazioni dei contaminanti.

9.1.2 Comprensione del sistema naturale

Per assicurare una modellazione accurata, il sito analizzato deve essere correttamente caratterizzato dal punto di vista della geologia, dell'idrogeologia e delle condizioni al contorno.

Si ha, quindi, la necessità di conoscere un considerevole numero di sondaggi verticali che consentano la ricostruzione della stratigrafia in sezioni appartenenti all'area oggetto di studio. All'aumentare del numero di sondaggi e della profondità degli stessi, aumenta il grado di comprensione della stratigrafia del sistema naturale; in realtà è molto importante anche l'ubicazione dei sondaggi perché, per una caratterizzazione più dettagliata, è necessario che questi siano rappresentativi dell'intera zona esaminata (McDonald & Harbaugh, 1989).

I sondaggi sono disponibili grazie all'installazione di piezometri nel 2012 e nel 2014, rispettivamente lungo la valle e presso la discarica Tre Monti.

9.1.3 Costruzione del modello concettuale

Dopo aver analizzato il sistema naturale, si passa alla fase di costruzione del modello concettuale che lo rappresenta. Un modello concettuale costituisce una semplificazione delle condizioni geologiche e idrogeologiche reali ed è in grado di descrivere gli aspetti essenziali del sistema.

Inizialmente, è fondamentale caratterizzare geologicamente l'area in esame, successivamente occorre occuparsi della concettualizzazione del sistema, che consiste nel definire i confini del dominio di studio e la loro geometria, nell'individuare il regime di flusso e le formazioni geologiche con le stesse caratteristiche idrogeologiche e nel rappresentare tutti gli elementi che si comportano come ricariche o perdite rispetto alla falda. (McDonald & Harbaugh, 1989).

Questa fase è uno passo cruciale nel processo di modellazione, perché prevede il trasferimento delle caratteristiche naturali dell'area in esame, in elementi che l'interfaccia può elaborare tramite il codice numerico. Questo prevede la conversione delle caratteristiche naturali (ad es. stratigrafia, fiumi, ricarica, pozzi) in elementi che l'interfaccia può elaborare.

9.1.4 Scelta del modello numerico

La fase di costruzione del modello concettuale è seguita dalla scelta del modello numerico da utilizzare nel problema specifico. I metodi numerici applicabili sono infatti diversi; tra questi si ricordano i metodi agli elementi finiti, in cui il dominio viene diviso in unità di forma regolare, solitamente rettangoli o triangoli, oppure, i metodi alle differenze finite che si basano sulla sovrapposizione di un reticolo al dominio analizzato e sul considerare l'equazione da risolvere, scritta per ogni nodo del reticolo stesso.

Le derivate parziali che compaiono nelle equazioni del flusso e del trasporto vengono approssimate con formule di derivazione numerica (McDonald & Harbaugh, 1989).

La modellazione presente in questo elaborato si avvale del codice alle differenze finite ed il modello di flusso è implementato allo stato stazionario.

9.1.5 Calibrazione e validazione del modello

La fase di calibrazione e validazione del modello è necessaria per superare la mancanza di dati, ma anche per verificare le ipotesi alla base della semplificazione del sistema naturale. Durante la calibrazione, i valori simulati dal modello, come la superficie piezometrica o le concentrazioni, vengono confrontati con valori misurati all'interno dello stesso dominio. I parametri di ingresso del modello sono sottoposti a variazioni fino a quando i valori simulati ed osservati coincidono, nel rispetto di una tolleranza prestabilita. La variazione può avvenire sia manualmente sia automaticamente. La calibrazione è una procedura molto importante e delicata che richiede un certo tempo. Lo scopo è verificare che il modello delle acque sotterranee relativo al sito di interesse risulti in grado di riprodurre i valori osservati nel sistema naturale. La validazione rappresenta, invece, una dimostrazione della possibilità di usare il modello per effettuare previsioni. Non esistono, però, criteri standard per dimostrare l'accuratezza del modello (McDonald & Harbaugh, 1989). Nella validazione si confrontano i risultati del modello con dati non utilizzati nella fase di calibrazione. Questa procedura è adottata soprattutto quando le condizioni simulate differiscono significativamente da quelle usate nella calibrazione. Se il modello calibrato non riproduce i risultati ottenuti con la validazione, lo stesso deve essere nuovamente calibrato servendosi di entrambe le serie di dati.

Le fasi di calibrazione e validazione si considerano terminate se sono stati simulati con successo tutti gli scenari possibili, senza variare le proprietà dei materiali o le caratteristiche degli acquiferi (McDonald & Harbaugh, 1989).

Nel presente modello numerico la calibrazione è stata effettuata sfruttando una piezometria, risalente al 2012, confrontando i carichi idraulici calcolati con quelli osservati.

9.1.6 Applicazione del modello

L'applicazione del modello rappresenta il momento principale della modellazione di un sistema di acque sotterranee, perché consiste nell'esecuzione vera e propria dello stesso, allo scopo di conseguire la soluzione numerica cercata.

L'esecuzione, comunemente chiamata *Run* nei software di modellazione, è il momento in cui il calcolatore risolve le equazioni differenziali mediante il codice numerico, restituendo un output alla fine della procedura di calcolo (McDonald & Harbaugh, 1989).

9.1.7 Presentazione dei risultati

I risultati (output) restituiti dai modelli numerici sono quantità finite, come, per esempio i valori dei carichi idraulici in punti discreti del dominio, in un dato tempo.

Questi risultati vengono generalmente resi più facilmente e velocemente comprensibili tramite presentazione grafica degli stessi in due o tre dimensioni (McDonald & Harbaugh, 1989).

In questo elaborato, l'output corrisponde alla piezometria del modello di flusso e alla propagazione del plume di contaminazione nel tempo, nel modello di trasporto.

9.2 Codice numerico alle differenze finite

Il codice Modflow, utilizzato in questo elaborato, è implementato tramite le differenze finite.

In matematica, il metodo delle differenze finite è una strategia utilizzata per risolvere numericamente equazioni differenziali, basandosi sull'approssimazione delle derivate con equazioni alle differenze finite.

Modflow rimpiazza il modello concettuale di partenza con una serie di punti discreti, disposti secondo una griglia, che genera un reticolo di celle quadrate.

I nodi della griglia sono i punti in cui vengono risolte le equazioni di flusso: per ogni nodo sono associati i parametri idrodinamici dell'acquifero.

Il nodo può trovarsi al centro della cella quadrata del reticolo formato dalla griglia (più utile per un flusso definito al limite) oppure all'intersezione delle linee griglia (più utile per un carico definito al limite).

La risoluzione dell'equazione differenziale è operata tramite la sostituzione della derivata $\partial h/\partial x$ (differenza infinitesima) con una differenza finita $\Delta h/\Delta x$ (misurabile).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Formula 1: equazione del flusso sotterraneo.

dove:

h = carico idraulico

K = conducibilità idraulica

W = volume del flusso d'acqua

S_s = immagazzinamento specifico

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{K_{xx} (h_3 - h_2)}{\Delta x} - \frac{K_{xx} (h_2 - h_1)}{\Delta x} \right]$$

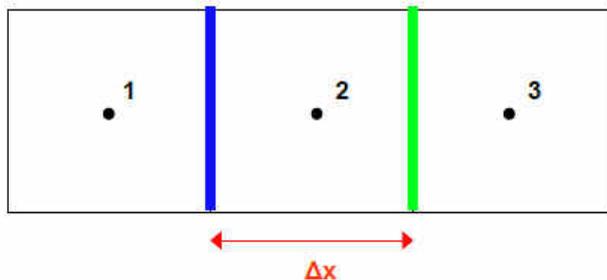


Figura 19: applicazione del concetto di “differenza finita” all’equazione di flusso.

L’equazione di flusso (Formula 1), assieme alla definizione delle condizioni al contorno (in termini di carichi o di flussi) ed alle condizioni iniziali (carichi), costituisce la rappresentazione matematica di un sistema di flusso delle acque sotterranee.

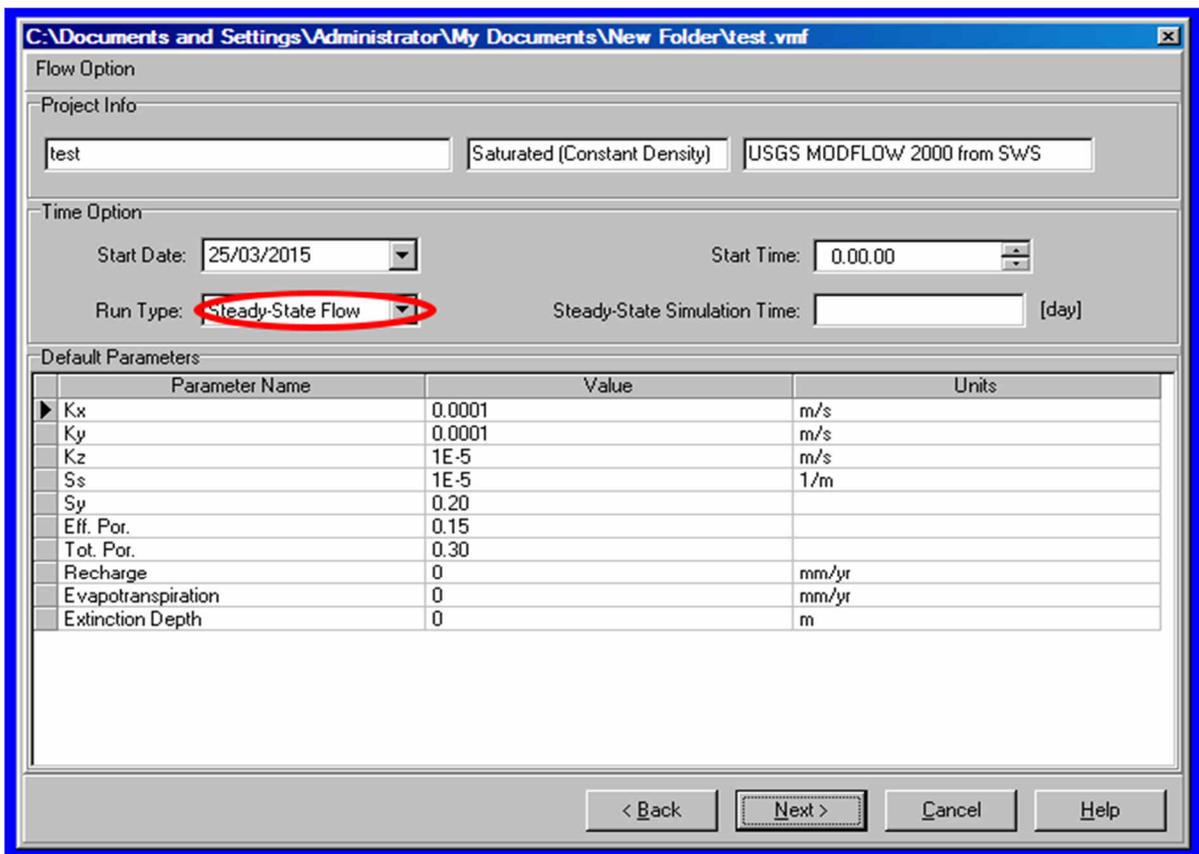
10. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO

Il software utilizzato è stato *Visual Modflow 4.6* ©, realizzato da *Schlumberger Water Services*, il quale comprende un'interfaccia grafica che supporta molteplici codici di modellazione.

In particolare, permette l'esecuzione dei seguenti motori di modellazione numerica:

- MODFLOW-2000: simulazione 3D del flusso (condizioni di saturazione e densità costante).
- MODPATH: simulazione 3D del trasporto advettivo a partire dagli output del flusso.
- ZONE BUDGET: calcolo dei flussi attraverso porzioni di dominio (bilanci di massa per porzioni del dominio).
- MT3D-MS: simulazione 3D del trasporto (advettivo, dispersivo, reattivo) di uno o più soluti.
- WinPEST: calibrazione automatica del modello e stima dei parametri dell'acquifero.
- SEAWAT: simulazione 3D del flusso a densità variabile (es. intrusione marina).
- 3Dexplorer: rappresentazione tridimensionale del modello (Input e Output).

Il codice utilizzato nel modello di flusso è stato MODFLOW-2000, impostato per simulare un flusso allo stato stazionario.



The screenshot shows the 'Flow Option' dialog box in Visual Modflow 4.6. The 'Project Info' section contains 'test', 'Saturated (Constant Density)', and 'USGS MODFLOW 2000 from SWS'. The 'Time Option' section shows 'Start Date: 25/03/2015', 'Start Time: 0.00.00', and 'Run Type: Steady-State Flow' (circled in red). The 'Default Parameters' table is as follows:

Parameter Name	Value	Units
Kx	0.0001	m/s
Ky	0.0001	m/s
Kz	1E-5	m/s
Ss	1E-5	1/m
Sy	0.20	
Eff. Por.	0.15	
Tot. Por.	0.30	
Recharge	0	mm/yr
Evapotranspiration	0	mm/yr
Extinction Depth	0	m

Figura 20: impostazione di un flusso allo stato stazionario in *Visual Modflow 4.6* ©.

10.1 Definizione della griglia

L'area di studio ricopre le dimensioni di 3729x1572 m ed è stata suddivisa in una griglia composta da 56 righe e 100 colonne, pertanto l'area di una singola cella è di 1047 m².

La risoluzione della griglia è stata aumentata in corrispondenza del Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo, adottando celle di 100 m² ciascuna, in modo da permettere una migliore precisione nella collocazione dei pozzi nella suddetta area (Figura 22).

Poiché la modellazione numerica riguarda la sola valle, sono state disabilitate tutte le celle non utili al calcolo, per non appesantire inutilmente il lavoro della CPU.

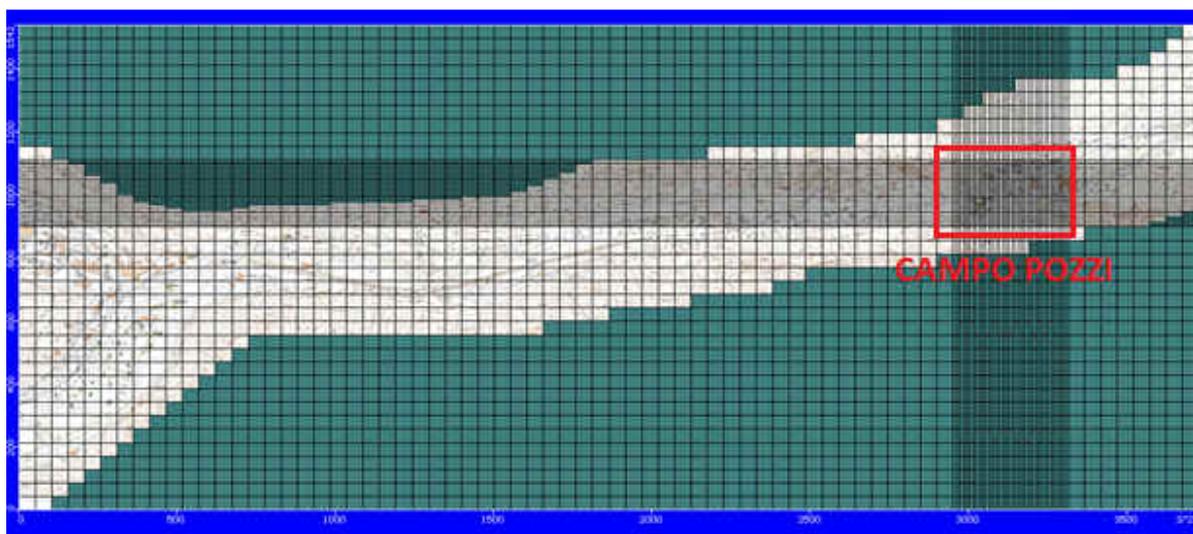


Figura 21: griglia di modellazione nell'interfaccia *Visual Modflow 4.6* ©.
Le celle azzurre sono disabilitate.

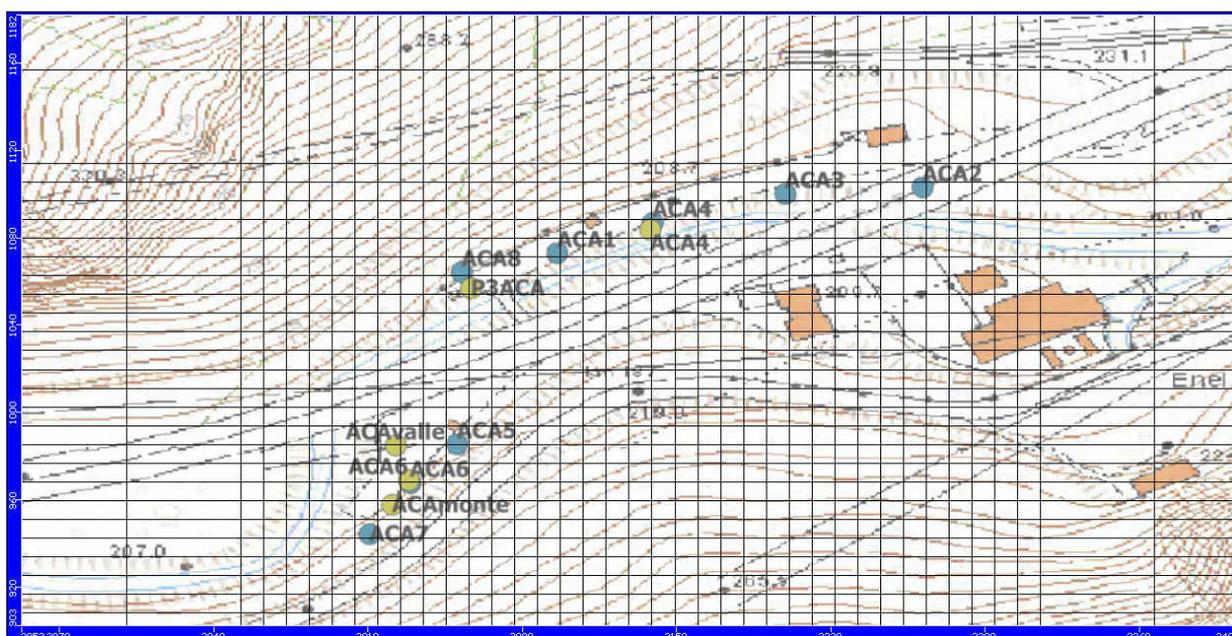


Figura 22: area del campo pozzi soggetta all'aumento di risoluzione della griglia.

10.2 Suddivisione in layers

Dal punto di vista altimetrico, il punto massimo del modello è rappresentato dalla prima colonna ad ovest, con elevazione 250 m s.l.m., mentre il punto minimo è situato presso l'ultima colonna a est, avente elevazione 210 m. Per la modellazione della superficie è stata assunta una pendenza lineare del 1,19%.

Per quanto riguarda la stratigrafia sono stati considerati i carotaggi eseguiti da Sondedile S.r.l., in occasione dell'installazione dei piezometri nel 2014, oltre ai dati stratigrafici relativi ai piezometri 2012.

A seguito dell'interpretazione delle sopraccitate indagini, il modello implementa 4 layers:

- 1) Ghiaia poligenica in matrice argilloso-limosa.
- 2) Limi argillosi.
- 3) Blocchi di travertino.
- 4) Ghiaia grossolana in matrice sabbioso-argillosa.

Ciascun layer è stato assunto avere una superficie piatta ed inclinazione costante.

Le ghiaie superficiali presentano da uno spessore iniziale di 10 m, fino ad arrivare a 20 m nel punto più a est.

I limi partono da 5 m, aumentano fino a 23 m in corrispondenza del campo pozzi e diminuiscono progressivamente fino allo spessore di 10 m, ai limiti del modello.

Il travertino risulta il layer più potente ad ovest, spesso 53 m, assottigliandosi però verso valle, fino a scomparire poco prima del campo pozzi.

Le ghiaie profonde presentano uno spessore di 20 m ad ovest, aumentando fino a 40 m nei pressi del margine orientale del modello.

A ciascun layer è stata assegnata una conducibilità idraulica compatibile con le indagini effettuate in situ durante le campagne di analisi del 2012 e del 2014:

- 1) Ghiaie superficiali: $K_x=8E-3$ m/s, $K_y=8E-3$ m/s, $K_z=8E-4$ m/s. (*Blu, in Fig. 23*)
- 2) Limi: $K_x=9,9E-6$ m/s, $K_y=9,9E-6$ m/s, $K_z=9,9E-7$ m/s. (*Verde, in Fig. 23*)
- 3) Travertino: $K_x=4E-4$ m/s, $K_y=4E-4$ m/s, $K_z=4E-5$ m/s. (*Azzurro, in Fig. 23*)
- 4) Ghiaie profonde: $K_x=2E-3$ m/s, $K_y=2E-3$ m/s, $K_z=2E-4$ m/s. (*Rosso, in Fig. 23*)

Poiché il travertino scompare poco prima del campo pozzi, il layer 3 è stato ridotto ad uno spessore simbolico di 1 m, a cui è stata assegnata la conducibilità idraulica dei limi.

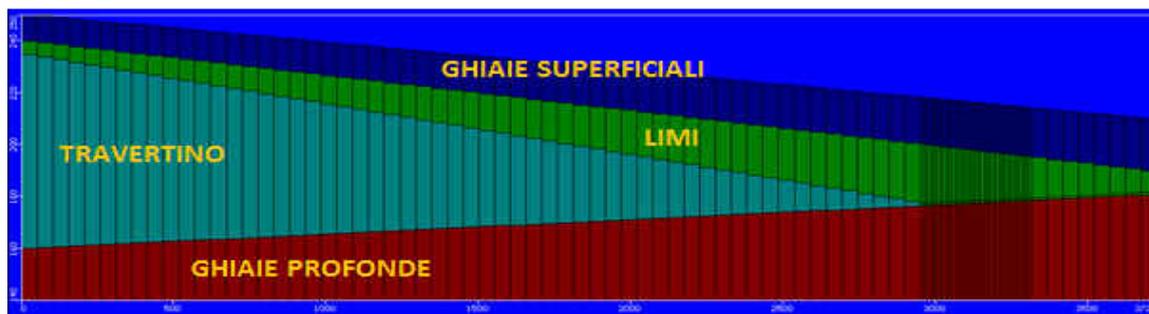


Figura 23: configurazione dei layers in una sezione longitudinale della valle.

10.3 Piezometria di riferimento

Il modello di flusso è stato implementato impiegando prevalentemente dati rilevati in seguito ad una campagna di indagine condotta nel 2012 (Tabella 3), quando sono stati misurati, in un intervallo di tempo ristretto, diversi piezometri, sia per la lettura della profondità della falda sia per l'analisi dei contaminanti. Successivamente, è stata condotta una seconda campagna di indagine nell'anno 2014, al fine di aumentare la risoluzione di analisi nei pressi della discarica (Tabella 4).

L'ubicazione dei piezometri copre l'intera gola, concentrandosi maggiormente sull'area della discarica, senza però trascurare il resto della valle del fiume Pescara, a ridosso del quale, a quota inferiore, si trova il Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo.

Per l'implementazione del modello sono stati utilizzati prevalentemente i dati del 2012, poiché forniscono informazioni più arealmente estese a tutta la valle.

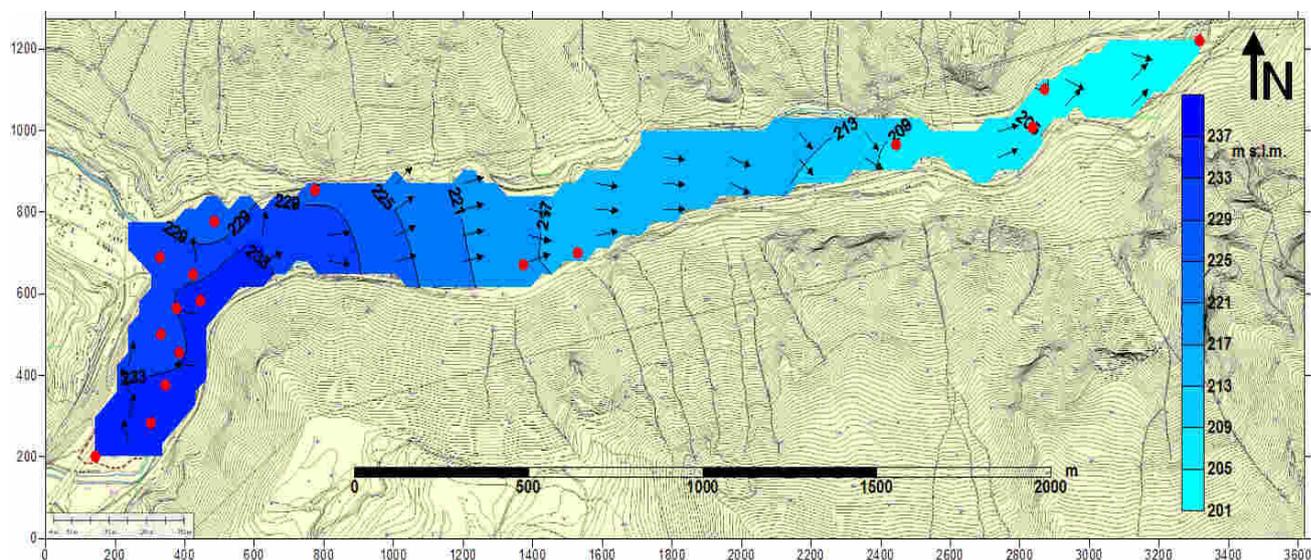


Figura 24: piezometria di riferimento realizzata nel 2012 (Chiarini, 2012).

NOME	WGS84 EST	WGS84 NORD	PROFONDITÀ FORO (m da p.c.)	TRATTO FILTRATO (m da p.c.)	QUOTA ASSOLUTA (m s.l.m.)
A2	13,850589	42,196219	20,3	3,0-20,3	213,80
A3	13,862287	42,196042	25,0	3,0-25,0	217,33
A5	13,855564	42,197542	20,0	3,0-20,0	224,98
ACA4	13,879906	42,199864	33,8	6,0-29,0	207,03
ACA6	13,878744	42,19865	55,0	13,5-45,5	207,51
ACAmonte	13,878665	42,19853	68,0	35,0-68,0	205,67
ACAvalle	13,878682	42,198818	42,0	22,3-42,0	205,04
B2	13,864029	42,196308	18,0	2,0-18,0	216,33
B3	13,874273	42,198477	18,0	3,0-18	207,67
C2	13,884051	42,200556	13,7	3,0-13,7	202,32
P3ACA	13,879044	42,19958	33,0	15,0-30,0	205,38
P41	13,851141	42,19517	10,0	1,0-8,0	233,16
P23,1	13,851826	42,195279	10,0	0-10,0	235,33
PF23,2	13,8518672	42,1953272	50,0	24,0-49,0	229,23
PF59,1	13,851638	42,195875	22,5	3,0-21,2	231,86
PF59,2	13,851715	42,195824	50,0	24,0-49,0	226,41
PF60,1	13,852369	42,196978	15,6	3,6-14,6	224,92
PF60,2	13,852351	42,196859	50,0	24,0-49,0	224,78
PF60,3	13,852451	42,196907	100,0	83,5-100,0	224,73
PP5	13,851396	42,19524	60,3	50,3-60,3	227,61
PZ1	13,850607	42,194673	13,5	0-13,5	228,68
PZ2	13,851219	42,194292	15,5	0-15,5	230,56
PZ3	13,850766	42,193636	6,0	0-6,0	237,66
PZ4	13,850292	42,192877	9,0	0-9,0	233,79
PZ5	13,848504	42,19219	15,0	0-15,0	235,72

Tabella 3: letture piezometriche relative all'anno 2012.



Figura 25: ubicazione dei piezometri installati nel 2012 (Regione Abruzzo, 2016).

NOME	WGS84 EST	WGS84 NORD	PROFONDITÀ FORO (m da p.c.)	TRATTO FILTRATO (m da p.c.)	QUOTA ASSOLUTA (m s.l.m.)
A	13,84787	42,19223	60	40-60	239,25
A'	13,84787	42,19226	20	3-7	239,37
B	13,84862	42,1931	80	24-80	240,42
B'	13,8486	42,19308	20	8-20	240,57
C	13,85134	42,19428	80	51-61	239,02
C'	13,85139	42,1943	20	6-12	237,55
D	13,85071	42,19459	80	60-80	237,88
D'	13,85074	42,19458	20	4,60-20	237,94
E	13,84964	42,19196	60	39-60	238,06
E'	13,84966	42,19197	20	3-12	238,05
F	13,85104	42,19387	60	49-60	237,73
F'	13,85102	42,19385	20	6-20	237,53
G	13,84902	42,19224	80	60-80	241,12
H	13,84945	42,19289	60	30-60	241,87
I	13,85053	42,19418	40	24-40	243,04
L	13,84969	42,19259	12	6-9	241,02
M	13,85022	42,19435	12	10-12	241,99
N	13,85004	42,19361	12	3-12	242,64
O	13,84935	42,19398	80	60-80	240,73
O'	13,84933	42,19396	20	8-20	240,7
P	13,84992	42,19473	80	60-80	239,22
P'	13,84993	42,19475	20	10-20	239,1
Q	13,84837	42,1919	60	51-60	238
Q'	13,8484	42,19188	12	3-12	237,92
R	13,8487	42,19241	20	11-15	240,47
S	13,84909	42,19264	60	40-60	241,29
T	13,84967	42,19352	40	30-40	241,58
U	13,84998	42,19398	40	30-40	242,24
V	13,85046	42,19364	40	15-40	243,24
Z	13,85027	42,19325	60	40-60	242,55

Tabella 4: letture piezometriche relative all'anno 2014.

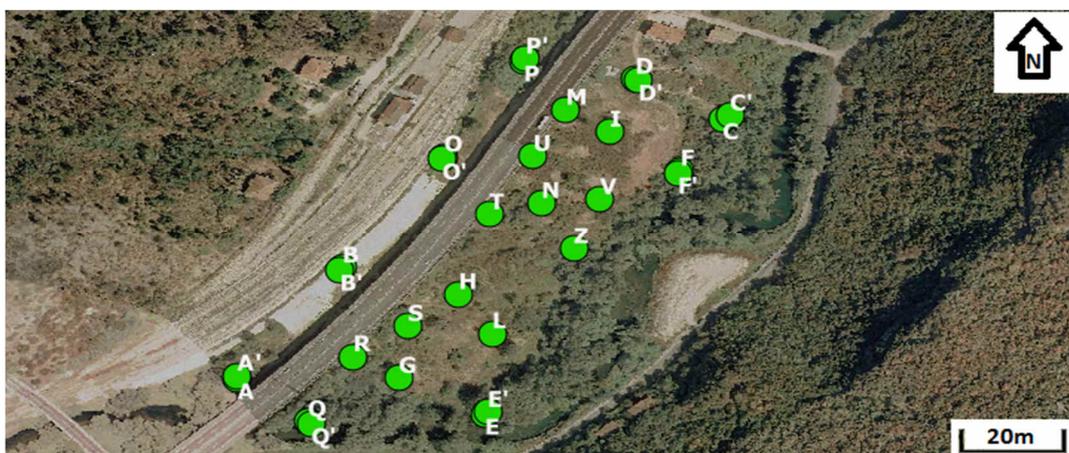


Figura 26: ubicazione dei piezometri installati nel 2014 (Regione Abruzzo, 2016).

10.4 Inserimento del campo pozzi

Il Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo è composto da 8 pozzi, gestiti da ACA (Azienda Comprensoriale Acquedottistica), operativi fino al 2007 (Figura 28, Tabella 5).

Suddetti pozzi hanno emunto quantità d'acqua crescenti, col passare degli anni (Rusi, 2007).

È stata calcolata una portata media, riferita al periodo compreso tra l'anno 1992 e l'anno 1998 (unico periodo in cui sono reperibili misure di portata; Rusi, 2007), per un emungimento complessivo di 370 L/s (Figura 27).

Nel modello numerico, ciascun pozzo è stato programmato per emungere, quindi, un ottavo della portata media complessiva, pari a 46,25 L/s ciascuno.

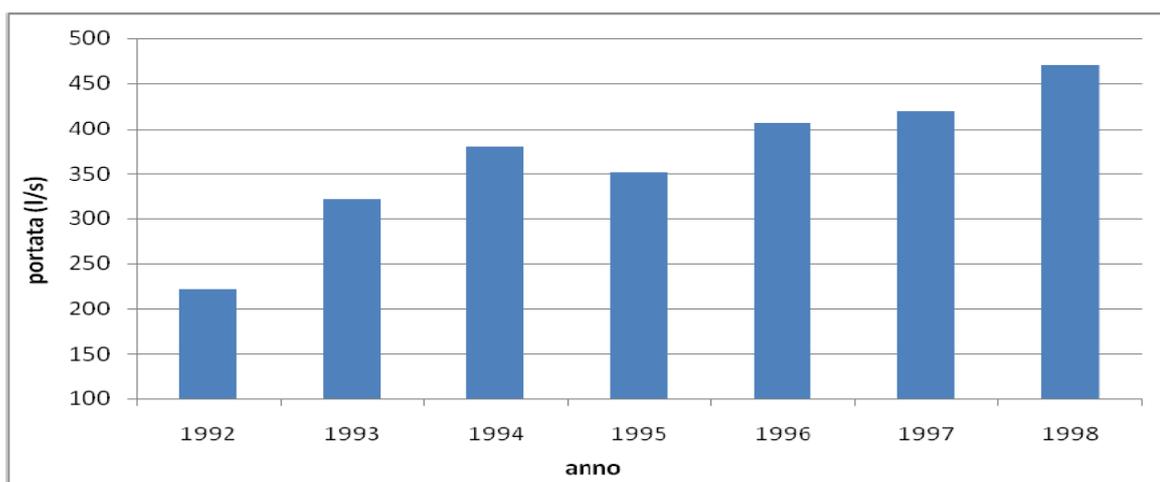


Figura 27: portate emunte dal 1992 al 1998 (Rusi, 2007).

NOME	WGS84 EST	WGS84 NORD	PROFONDITÀ	T. FILTRATO
ACA1	13,879459	42,19975	43 m	15-29,2 m
ACA2	13,881217	42,200069	38 m	10-33 m
ACA3	13,880556	42,200037	38 m	10-33 m
ACA4	13,879918	42,199897	43 m	15-29,2 m
ACA5	13,878977	42,198824	60 m	35-55 m
ACA6	13,878751	42,198637	60 m	35-55 m
ACA7	13,878556	42,198388	60 m	35-55 m
ACA8	13,879	42,199657	43 m	15-29,2 m

Tabella 5: dati relativi ai pozzi di Colle Sant'Angelo.



Figura 28: ubicazione dei singoli pozzi.

10.5 Stima della ricarica

Sull'area si ha una precipitazione media di 560 mm/anno (Figura 29), rilevata dalla stazione meteorologica di Capestrano, poco distante da Bussi, con una temperatura media di 13,3 °C.

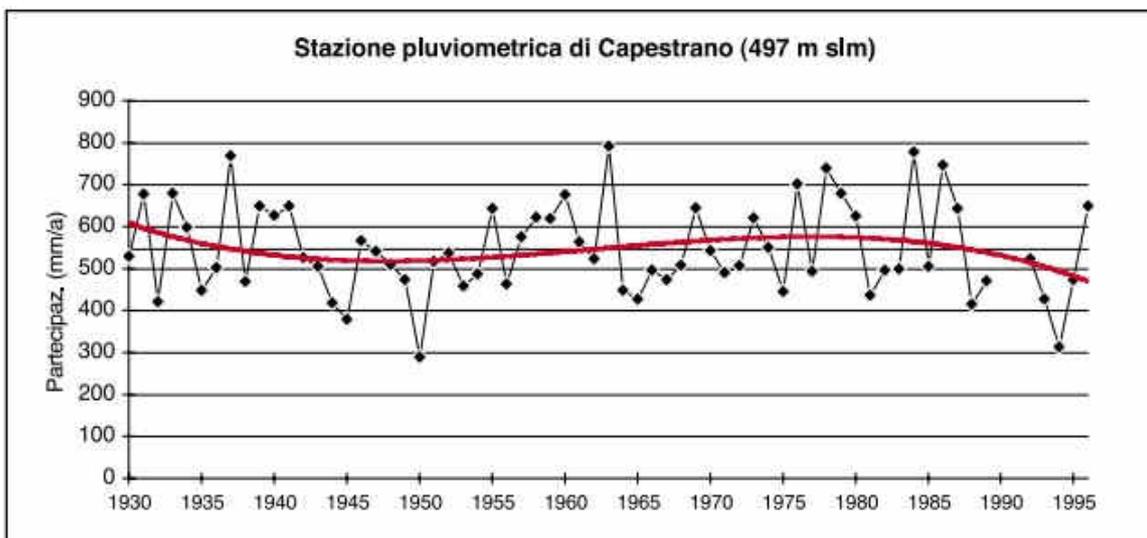


Figura 29: precipitazioni rilevate dalla stazione di Capestrano dal 1930 al 1995.

L'evapotraspirazione è stata invece calcolata mediante formula di Turc, la quale restituisce l'evapotraspirazione reale annua.

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Dove ET = evapotraspirazione vera annua
P = totale precipitazioni annue in mm
 $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$
T = temperatura media annuale dell'aria in gradi Celsius alla quota media dell'area di interesse

Formula 2: metodo di Turc per il calcolo dell'evapotraspirazione reale annua,

Secondo la Formula 2, l'evapotraspirazione è stimabile in 384 mm/anno, per cui la ricarica che è stata considerata nel modello consta in 176 mm/anno.

Si tratta comunque di una stima elevata, dato che una parte dell'acqua di pioggia efficace ruscellerà e non si infiltrerà. Pertanto la ricarica di fatto sarà inferiore a questo valore.

10.6 Il fiume Pescara ed i carichi costanti

Nell'area di modellazione è stato preso in considerazione il fiume Pescara, assegnandogli la stessa pendenza della valle, tramite un gradiente lineare (Figura 30).

Nel punto sommitale è stato assegnato un River Stage di 240 m s.l.m., un River Bottom di 239,5 m s.l.m., una Bottom Thickness di 0,5 m con conducibilità idraulica $1E-4$ m/s ed una larghezza del corso d'acqua di 2,5 m.

Nel punto più a valle, gli unici parametri variati sono stati il River Stage, assegnato a 200 m s.l.m. ed il River Bottom, impostato a 199,5 m s.l.m.

Non è stato invece considerato l'affluente Tirino a causa della scarsa interazione con la falda e per la bassa portata relativa in entrata al fiume Pescara.

Inoltre, sono stati assegnati dei carichi costanti (Constant Heads) ad est e ad ovest, sulla base della piezometria elaborata nel 2012, rispettivamente di 200 m s.l.m. e di 240 m s.l.m.

Tutti i suddetti elementi occupano il layer numero 1 del modello, corrispondente alle ghiaie superficiali.

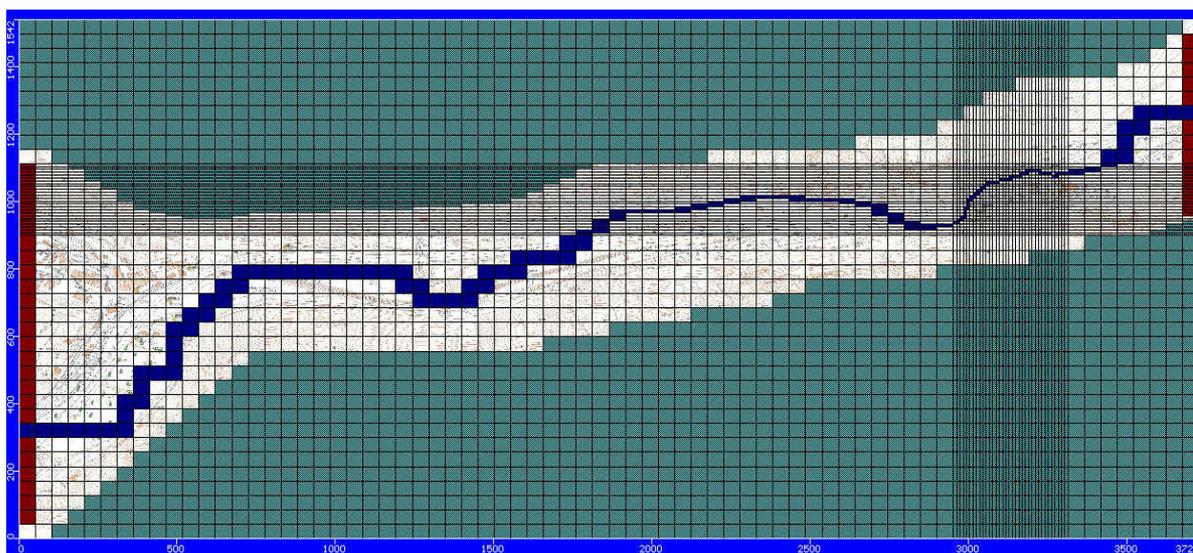


Figura 30: in blu è evidenziato il River Pescara, mentre in rosso i Constant Heads.

10.7 Flussi ortogonali alla valle (diluizione)

Come illustrato negli studi relativi ai flussi in falda, le Gole di Popoli sono il recapito di massicce quantità d'acqua, non si può quindi trascurare la diluizione. (Habetswallner, 2008).

Ai fini dell'implementazione del modello sono stati stimati i flussi ortogonali alla valle, limitatamente all'area della griglia, tenendo presente che la zona di studio è un sottoinsieme molto più ristretto delle intere Gole di Popoli, sviluppate per più di 45 km e considerando gli studi relativi agli incrementi di portata del fiume Pescara lungo il suo corso (Desiderio *et al.*, 2000).

Concettualmente, per simulare un flusso in *Visual Modflow 4.6* © si utilizza la funzione di pozzo, assegnando un valore positivo all'emungimento, in modo da renderlo un pozzo di iniezione che simuli un flusso nella cella in cui si trova.

Si è quindi stimato che i flussi ortogonali alla valle siano di 1044 L/s (522 L/s da nord e 522 L/s da sud); pertanto sono stati inseriti una serie di pozzi che immettono acqua nei layers 3 e 4, ovvero nella parte inferiore del complesso travertinico e nella parte sommitale delle ghiaie profonde (Habetswallner, 2008).

Poiché il modello è costituito da 100 colonne, sono presenti 100 pozzi a nord e 100 pozzi a sud del fiume e ciascuno immette nel modello 1/200 del flusso complessivo stimato, pari a 5,22 L/s, in modo da distribuirlo lungo l'intera area di modellazione (Figura 31).



Figura 31: assegnazione dei pozzi per simulare i flussi ortogonali alla valle.

10.8 Esecuzione della modellazione

Per l'operazione di *Run* è stato configurato il codice numerico MODFLOW-2000 con un Solver PCG (Figura 32).

Inoltre è stato attivato il Rewetting delle celle, il quale evita la disattivazione delle stesse qualora, durante il processo di calcolo, si trovino temporaneamente senza acqua, eventualità possibile nelle varie fasi di modellazione, ad opera del Solver, prima che il Run giunga a convergenza.

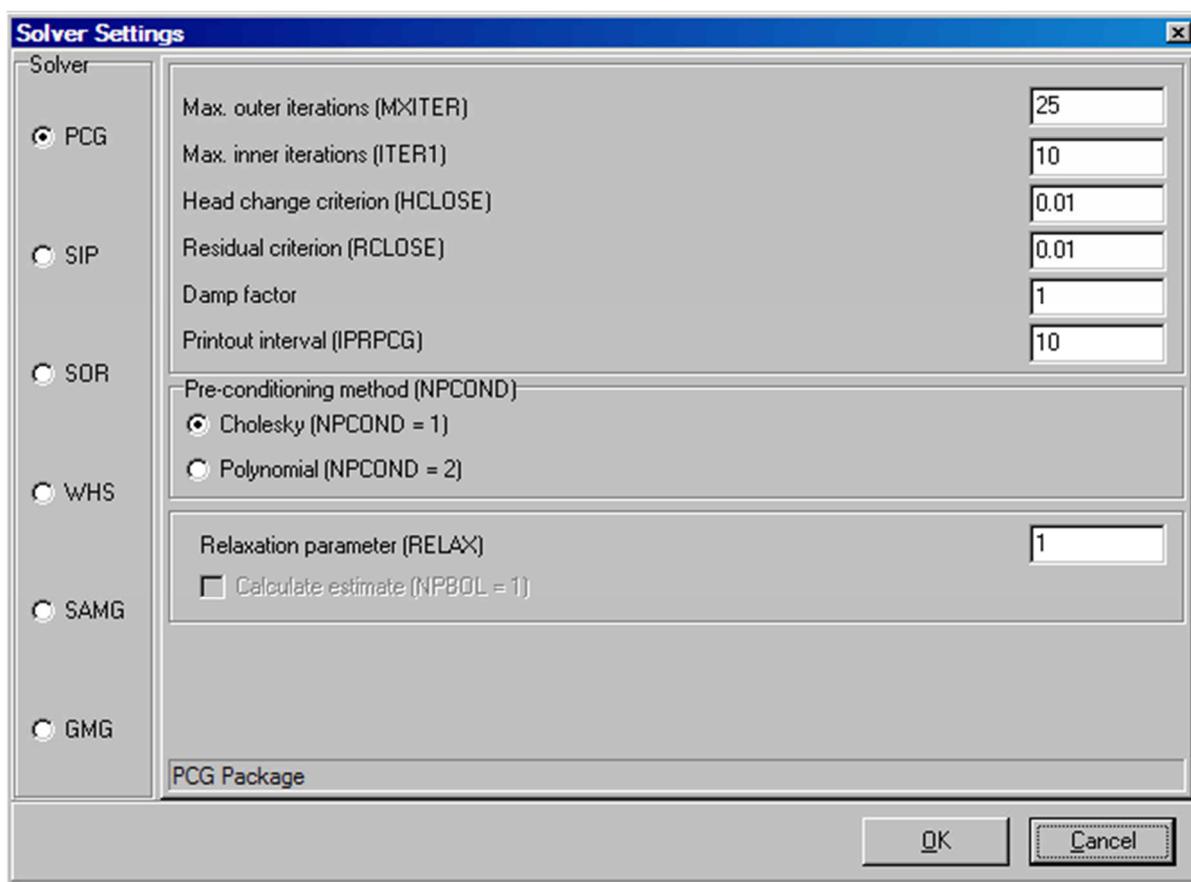


Figura 32: impostazione del Solver PCG, coi parametri di default.

10.9 Output del modello di flusso

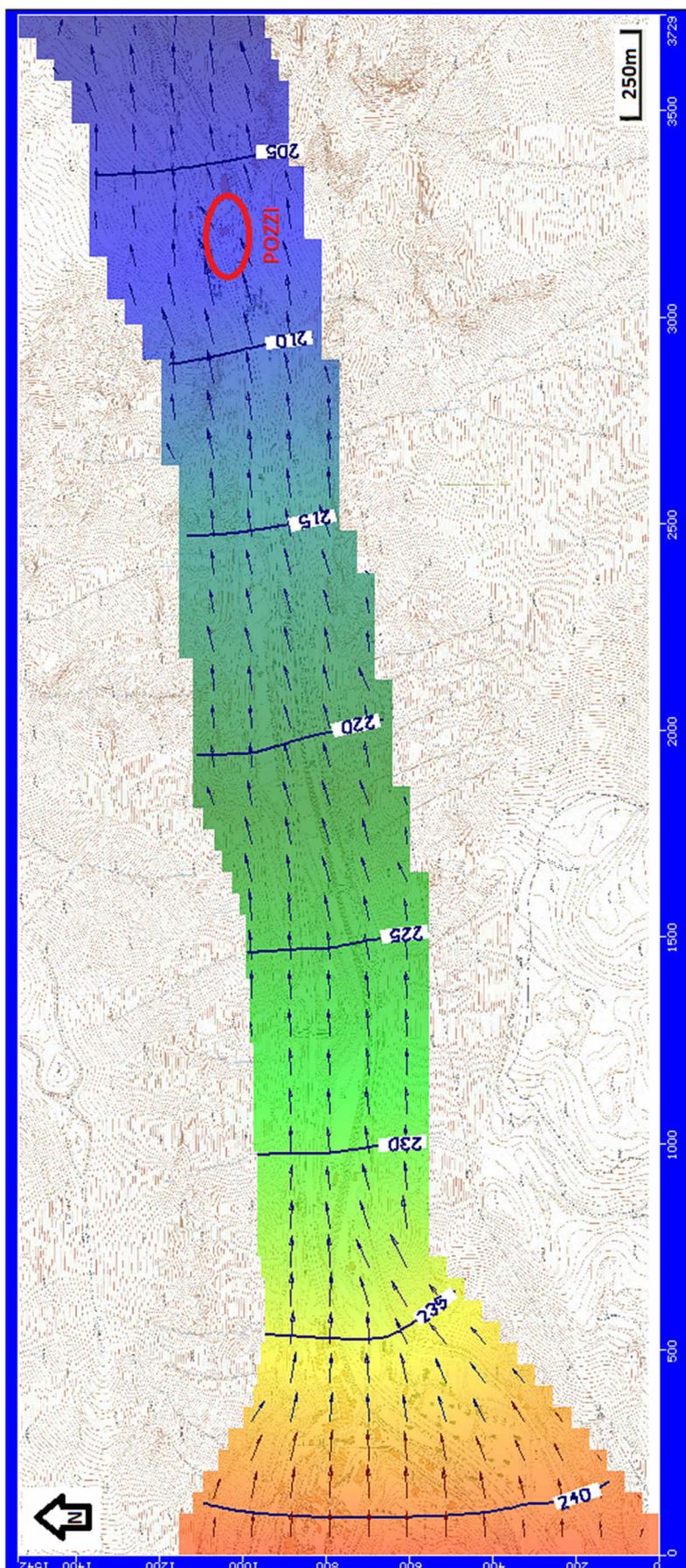


Figura 33: piezometria, con direzione dei flussi, ottenuta in Output, evidenziata mediante Color Shading.

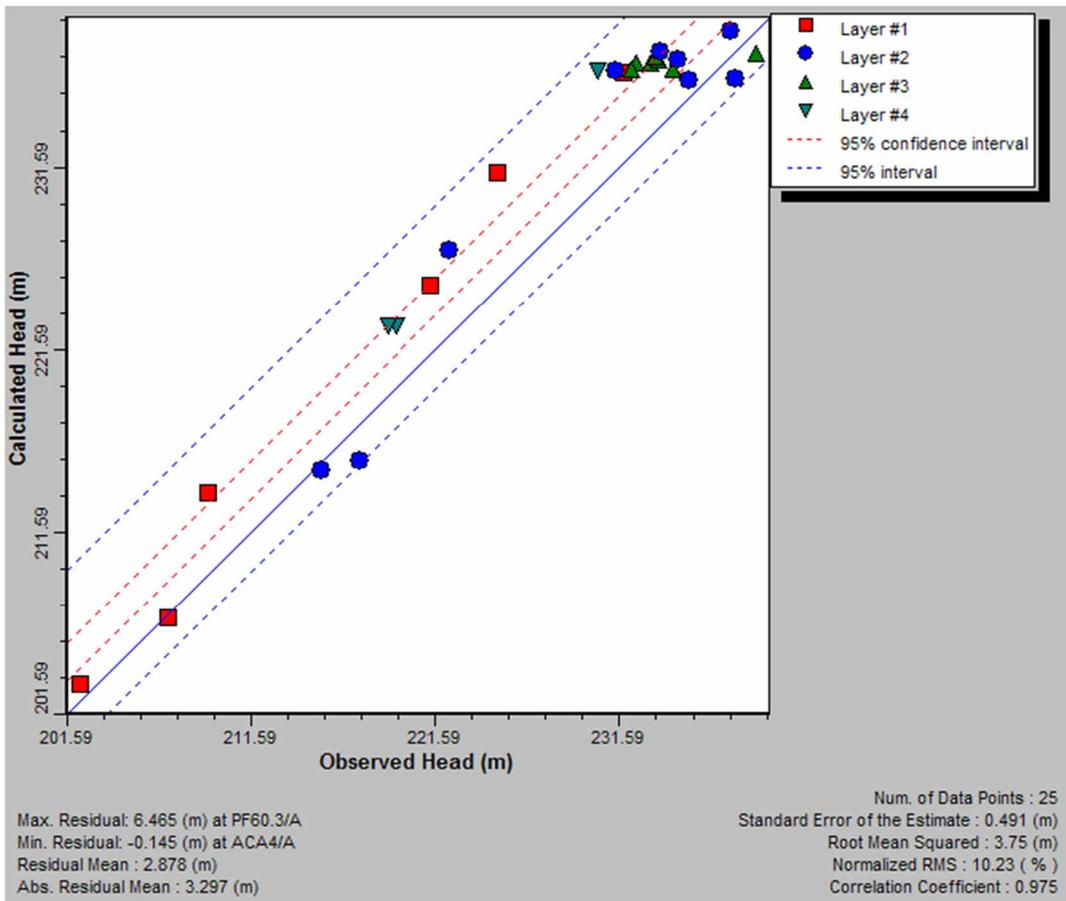


Figura 34: relazione tra piezometria reale e calcolata dal modello.

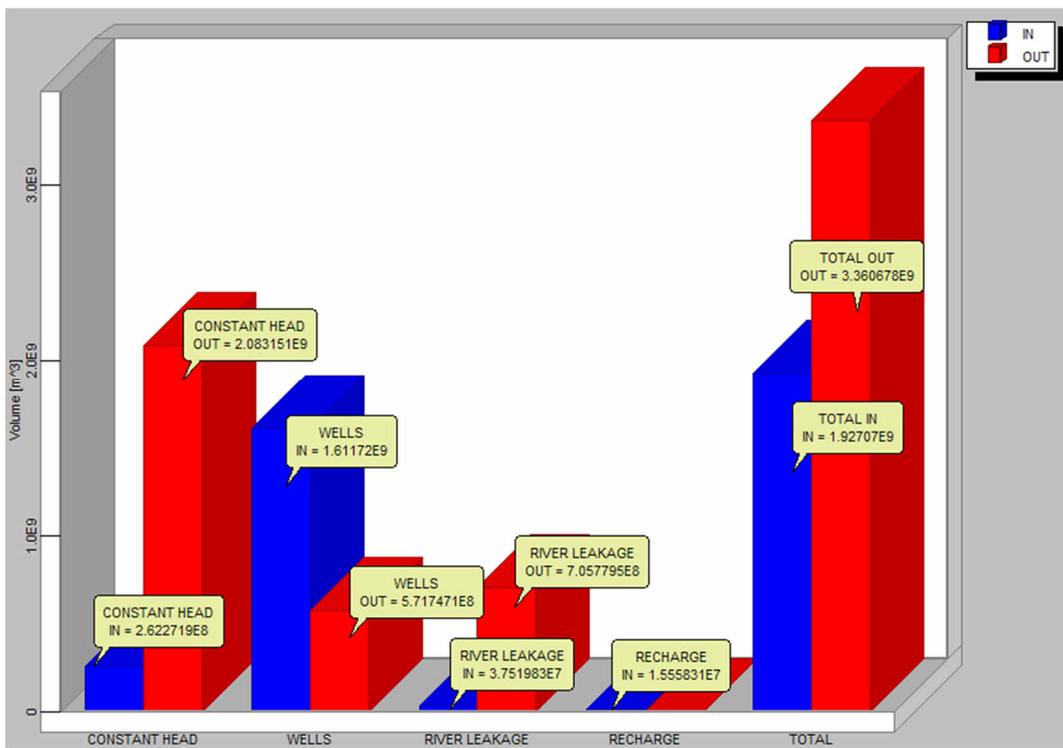


Figura 35: bilanci di massa d'acqua in uscita (rosso) ed in entrata (blu), allo stato stazionario.

10.10 Presentazione dei risultati

Dall'output del modello (Figura 33) è possibile osservare che la direzione principale del flusso è da monte verso valle, seguendo sostanzialmente il gradiente topografico.

Infatti, la piezometria assume un valore massimo di 241 m s.l.m. nel punto più ad ovest e di 201 m s.l.m. nel punto più ad est della valle.

Osservando, inoltre, i bilanci di massa in Figura 35, è possibile capire quali sono gli elementi che apportano ingressi di volumi d'acqua o perdite, allo stato stazionario, dal modello.

È possibile osservare uno scambio fiume-falda (River Leakage) significativo ed è possibile asserire che il fiume alimenta la falda (OUT superiore ad IN) nella maggior parte delle celle comprese nella porzione delle Gole di Popoli esaminate da questo elaborato.

La ricarica (Recharge) è, invece, del tutto irrilevante sul bilancio di massa generale.

Gli apporti ortogonali alla valle (Wells IN) sono significativi e indicano una forte diluizione del flusso, dovuta alla ricarica laterale sotterranea.

Proseguendo nell'osservazione della Figura 35, si nota anche che i pozzi ACA (Wells OUT) sottraggono acqua al modello a causa del loro normale emungimento nel tempo.

Per quanto riguarda i carichi costanti assegnati, essi sono i principali responsabili della perdita d'acqua (si osservi Constant Head OUT).

Nel complesso (Total) il modello, allo stato stazionario, perde più acqua di quanta ne riceva, questo può indicare che la maggior parte d'acqua (sia superficiale che sotterranea) scorre verso valle e prosegue verso est, compatibilmente con la piezometria osservata e la topografia dell'area.

Il modello di flusso risulta sufficientemente calibrato, infatti osservando il grafico in Figura 34, il quale mette in relazione la piezometria calcolata con quella osservata nel 2012, si può leggere un RMS normalizzato del 10,23%, anche se sono presenti alcuni residui significativi. Ad esempio presso il piezometro PF60.3 vi è un divario di più di 6 m tra la piezometria reale ed osservata. Questi errori sono probabilmente dovuti alle assunzioni e semplificazioni decise in fase di progettazione modellistica della stratigrafia del sottosuolo, che potrebbero non rispecchiare completamente le reali condizioni stratigrafiche in quel preciso punto.

Una volta terminato e calibrato il modello di flusso, si è proceduto con l'implementazione del modello di trasporto, che verrà trattato nel prossimo capitolo.

11. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI TRASPORTO

Una volta implementato e calibrato il modello di flusso è stato possibile utilizzarlo per simulare un possibile trasporto di sostanze contaminanti, sversate nella discarica Tre Monti e giunte al Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo.

Come assertedo al Paragrafo 8.1, è stato considerato il PCE, inquinante prevalentemente rilevato durante le indagini effettuate nel 2012, misurato nei piezometri a ridosso dei pozzi ACA, quantificabile in approssimativamente 5 µg/L (Tabella 6).

NOME	PROFONDITA' (m da p.c.)	TRATTO FILTRATO (m da p.c.)	PCE (µg/L)
A2	20,3	3,0-20,3	<0,05
A3	25,0	3,0-25,0	1,09
A5	20,0	3,0-20,0	1,56
ACA4	33,8	6,0-29,0	4,8
ACA6	55,0	13,5-45,5	4,3
ACAmonte	68,0	35,0-68,0	5,4
ACAvalle	42,0	22,3-42,0	5,6
B2	18,0	2,0-18,0	0,76
B3	18,0	3,0-18	10,7
C2	13,7	3,0-13,7	1,17
P3ACA	33,0	15,0-30,0	5,1
P41	10,0	1,0-8,0	<0,05
P23,1	10,0	0-10,0	1,06
PF23,2	50,0	24,0-49,0	1,16
PF59,1	22,5	3,0-21,2	<0,05
PF59,2	50,0	24,0-49,0	7,3
PF60,1	15,6	3,6-14,6	10,3
PF60,2	50,0	24,0-49,0	15,6
PF60,3	100,0	83,5-100,0	0,82
PP5	60,3	50,3-60,3	48
PZ1	13,5	0-13,5	218
PZ2	15,5	0-15,5	<0,05
PZ3	6,0	0-6,0	6,3
PZ4	9,0	0-9,0	1,04
PZ5	15,0	0-15,0	<0,05

Tabella 6: quantitativi di PCE rilevati dai piezometri del 2012 lungo la valle; evidenziati in giallo quelli nei pressi del Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo.

La modellazione del trasporto ha considerato il layer 3, dunque il travertino, ovvero lo strato maggiormente contaminato lungo la direzione della valle.

In particolare, si osservi in Tabella 7 il piezometro D', filtrato nel travertino, che riporta una concentrazione di PCE di 804 µg/L.

Non sono invece stati considerati i piezometri M e N in quanto, seppur indicatori di una concentrazione maggiore, sono superficialmente troppo prossimi alla discarica, pertanto il loro impiego nel modello di trasporto provocherebbe una sovrastima delle dimensioni del plume lungo la valle.

NOME	PROFONDITÀ FORO (m da p.c.)	T. FILTRATO (m da p.c.)	PCE (µg/L)
A	60	40-60	0,05
A'	20	3-7	0,05
B	80	24-80	0,05
B'	20	8-20	0,05
C	80	51-61	0,454
C'	20	6-12	0,134
D	80	60-80	0,05
D'	20	4,60-20	804
E	60	39-60	0,05
E'	20	3-12	0,05
F	60	49-60	31,2
F'	20	6-20	465
G	80	60-80	0,1
H	60	30-60	0,05
I	40	24-40	207
L	12	6-9	0,05
M	12	10-12	10900
N	12	3-12	3800
O	80	60-80	0,05
O'	20	8-20	1
P	80	60-80	0,05
P'	20	10-20	1,79
Q	60	51-60	0,05
Q'	12	3-12	0,05
R	20	11-15	0,919
S	60	40-60	0,05
T	40	30-40	0,632
U	40	30-40	37,2
V	40	15-40	53,2
Z	60	40-60	0,05

Tabella 7: quantitativi di PCE rilevati dai piezometri del 2014, nei pressi della discarica; evidenziata in giallo la maggiore concentrazione rilevata nel travertino.

11.1 Input della contaminazione

È noto che la discarica abusiva è diventata operativa nel 1963 ed i contaminanti hanno continuato a percolare negli strati inferiori, specialmente nel travertino, anche dopo la messa in sicurezza provvisoria del 2010.

Nel modello è stata quindi considerata una durata dello sversamento pari a 49 anni, relativi al periodo 1963-2012, nel quale si è assunto un rilascio costante nel tempo.

Alla luce di queste considerazioni e adottando la concentrazione rilevata dal piezometro D' (Tabella 7), nell'area della discarica sono state impostate una Initial Concentration di 800 $\mu\text{g/L}$ ed una Constant Concentration di altrettanti 800 $\mu\text{g/L}$, per un periodo di 49 anni.

Riguardo al travertino, è stata adottata una porosità efficace di 0,3 (Guéguen *et al.*, 1992).

Inoltre, è stato considerato un adsorbimento nel tempo del PCE mediante una Linear Isotherm avente un K_d di $1,55\text{E-}9$ $\text{L}/\mu\text{g}$, calcolato assumendo un f_{oc} di 0,01, percentuale di carbonio organico contenuto nella frazione limosa, ed K_{oc} relativo al PCE di $1,55\text{E-}7$ $\text{L}/\mu\text{g}$ (ISS-ISPEL, 2009).

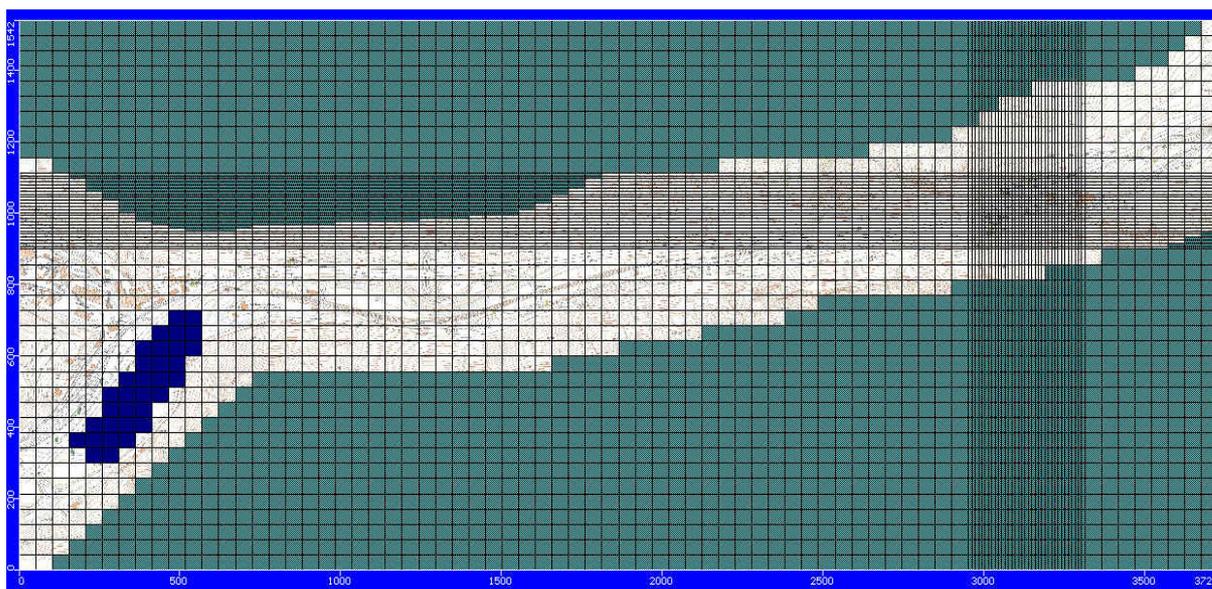


Figura 36: area di immissione della contaminazione, corrispondente alla discarica abusiva Tre Monti.

11.2 Parametri MT3D-MS

Il Run è stato eseguito mediante un Implicit PCG Solver, implementato dal motore di modellazione numerica MT3D-MS, per il quale sono stati impostati i seguenti parametri:

- Initial Step Size: 100 days
- Maximum Step Size: 200 days
- Multiplier: 1,1
- Use effective porosity
- Min. sat. thickness: 0,001

Invece, per quanto riguarda l'Output & Time Series Control, la durata della modellazione è stata di 17885 giorni, pari ad un periodo di 49 anni, con un numero massimo di 10000 Transport Steps, mentre sono stati immessi i seguenti Time Steps:

- 30 days
- 365 days
- 3650 days
- 7300 days
- 10950 days
- 14600 days
- 17885 days

I Time Steps restituiscono un Output rispettivamente a 30 giorni, 1 anno, 10 anni, 20 anni, 30 anni, 40 anni, fino a 49 anni, partendo dal tempo zero, ovvero data di realizzazione della discarica, fino al 2012, anno in cui sono avvenute le letture piezometriche.

The screenshot shows the 'Output & Time Step Control' dialog box. The 'Simulation time' is set to 17885 day(s). The 'Max # transport Steps' is set to 10000. There is an unchecked checkbox for 'Specify max stepsize: 0 day(s)'. Under 'Save simulation results at', the 'Specified times [day(s)]' option is selected. The 'Output Time(s) [day]' list contains: 30, 365, 3650, 7300, 10950, 14600, and 17885. Below this list are buttons for '+', 'X', and a list icon. Under 'Save concentration at observation point for every N-th time step: N = 1'. Under 'Save one-line summary of mass budget for every N-th time step: N = 1'. At the bottom, there is a checked checkbox for 'Save .CBM/.CCM file (for Mass Balance output)'. The dialog has 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom right.

Figura 37: inserimento dei Time Steps in MT3D-MS.

11.3 Output del modello di trasporto

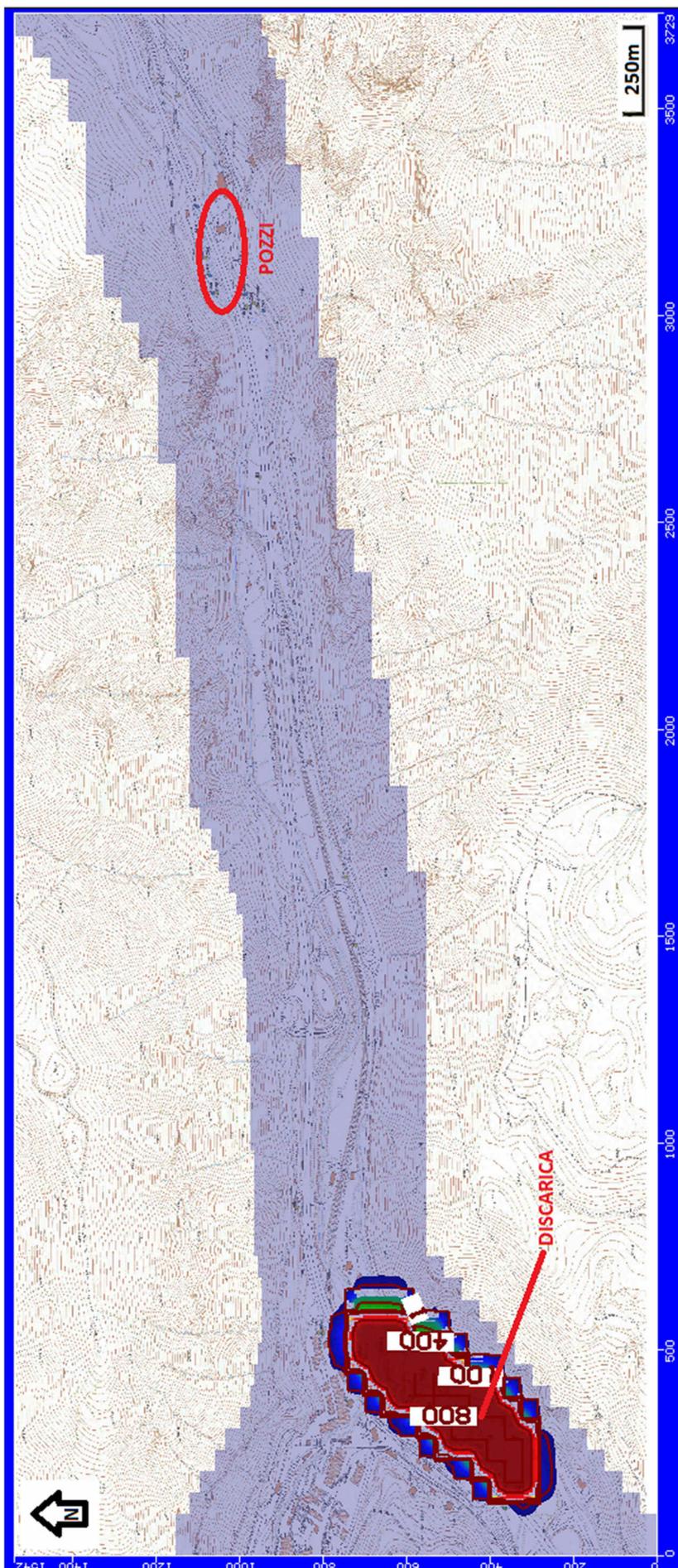


Figura 38: output
dopo 30 giorni;
concentrazioni
espresse in $\mu\text{g/L}$.

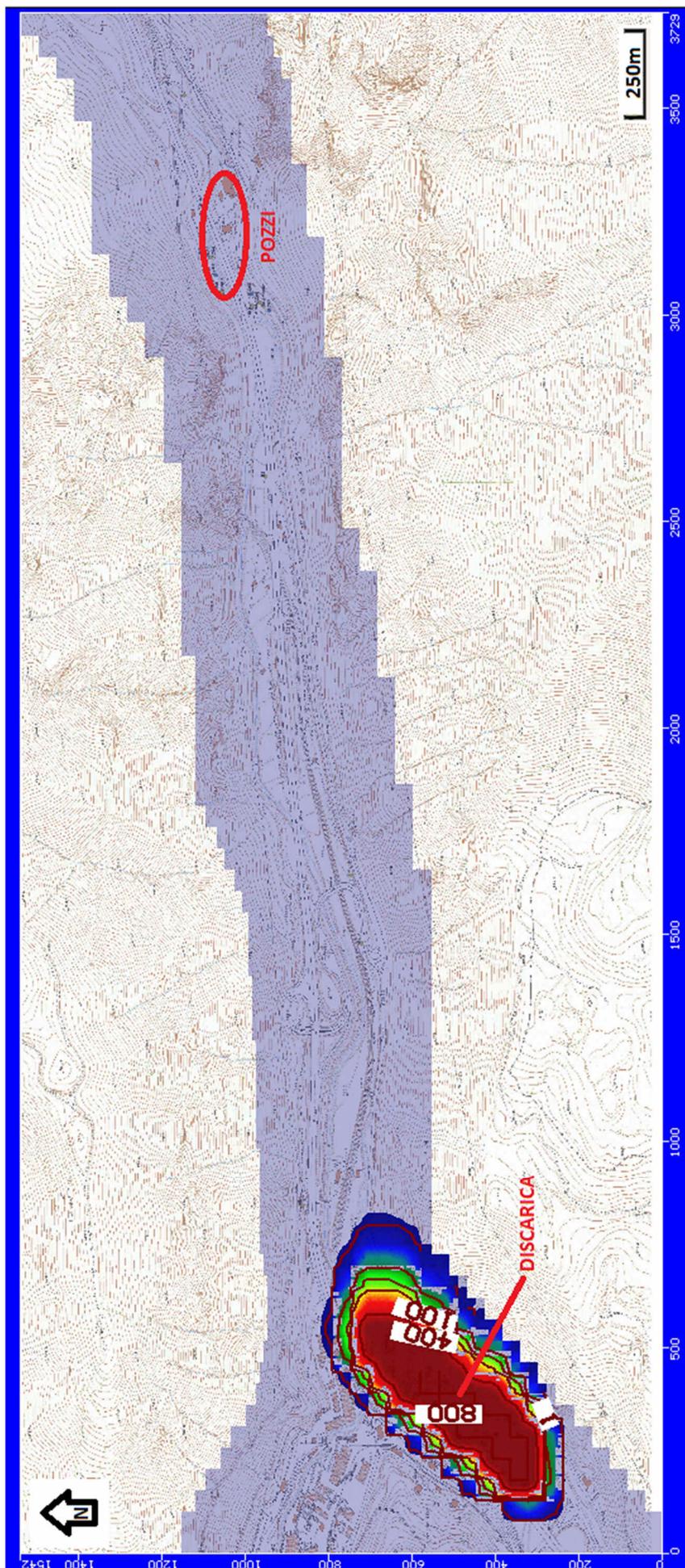


Figura 39: output
dopo 365 giorni;

concentrazioni
espresse in $\mu\text{g/L}$.

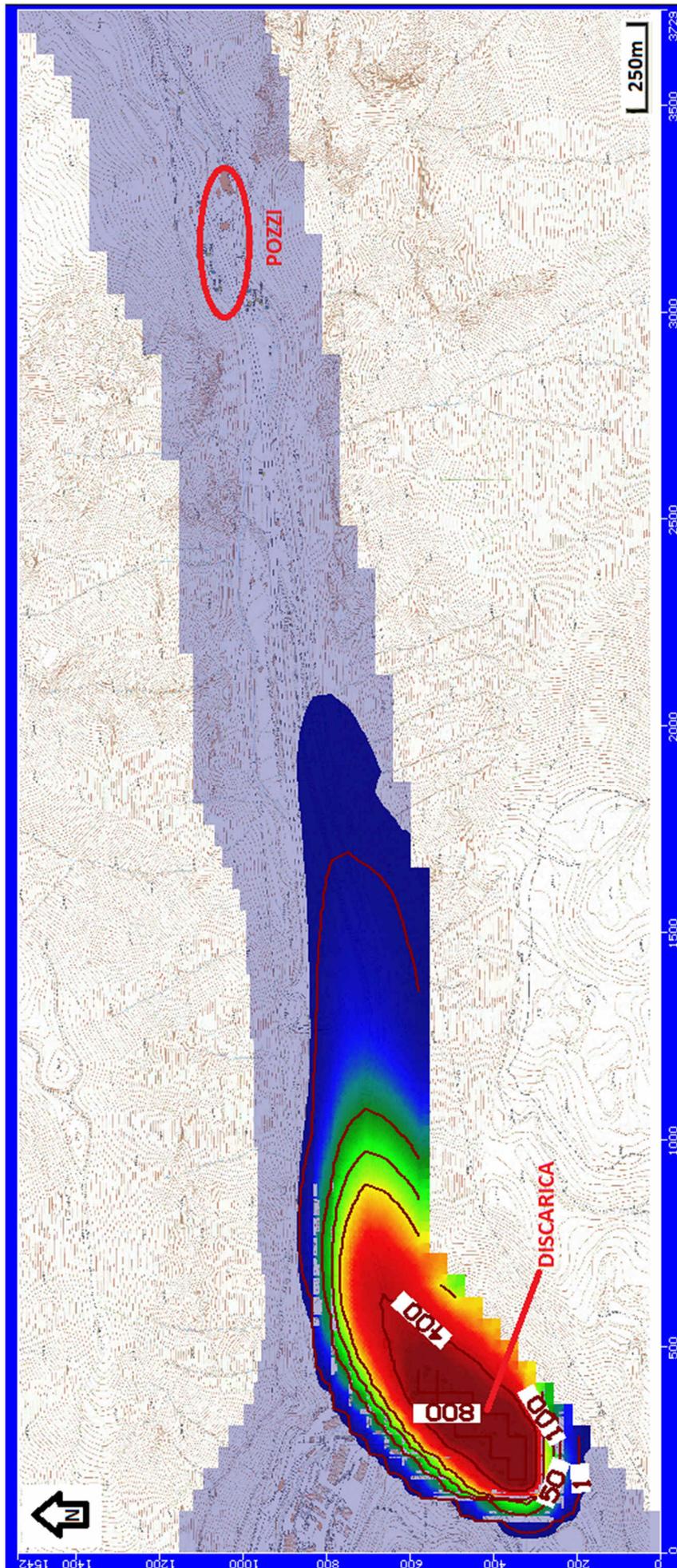


Figura 40: output
dopo 10 anni;
concentrazioni
espresse in $\mu\text{g/L}$.

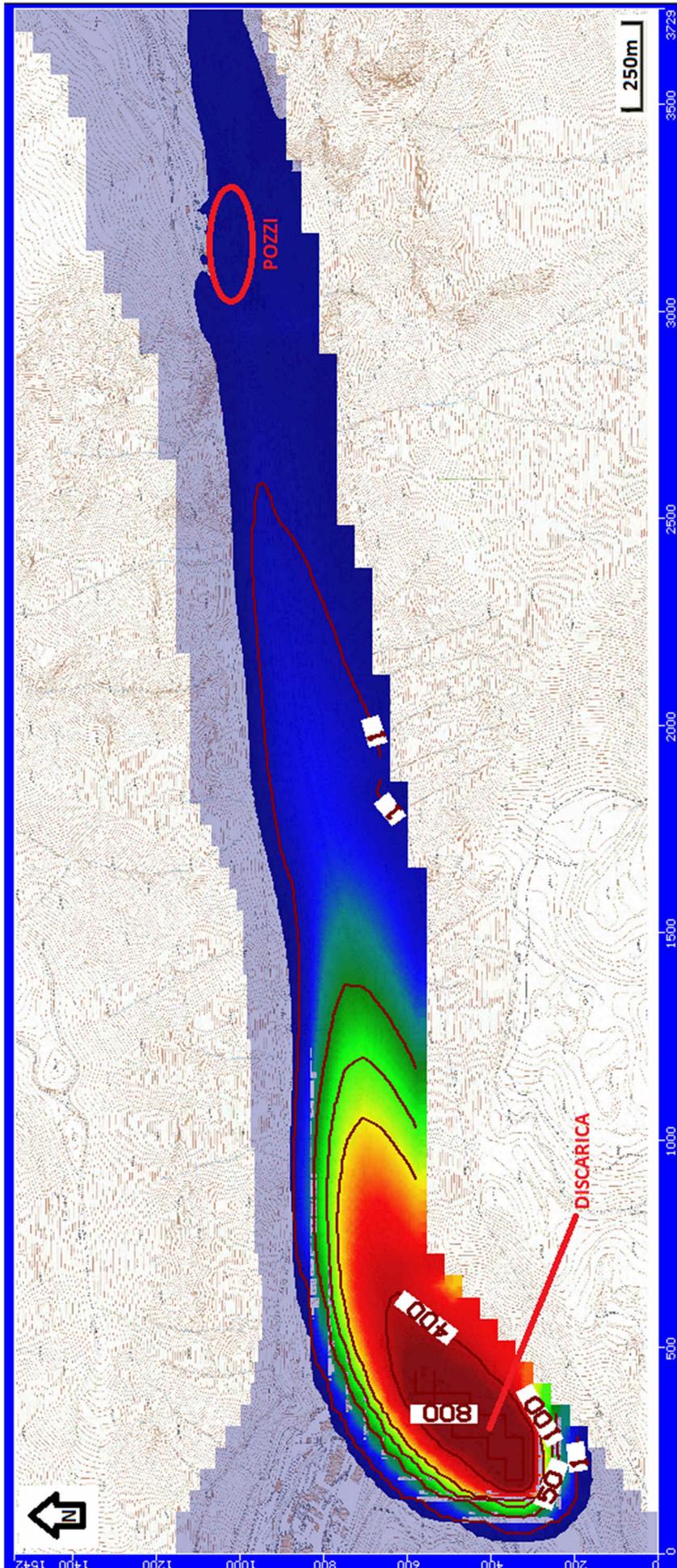


Figura 41: output
dopo 20 anni;
concentrazioni
espresse in $\mu\text{g/L}$.

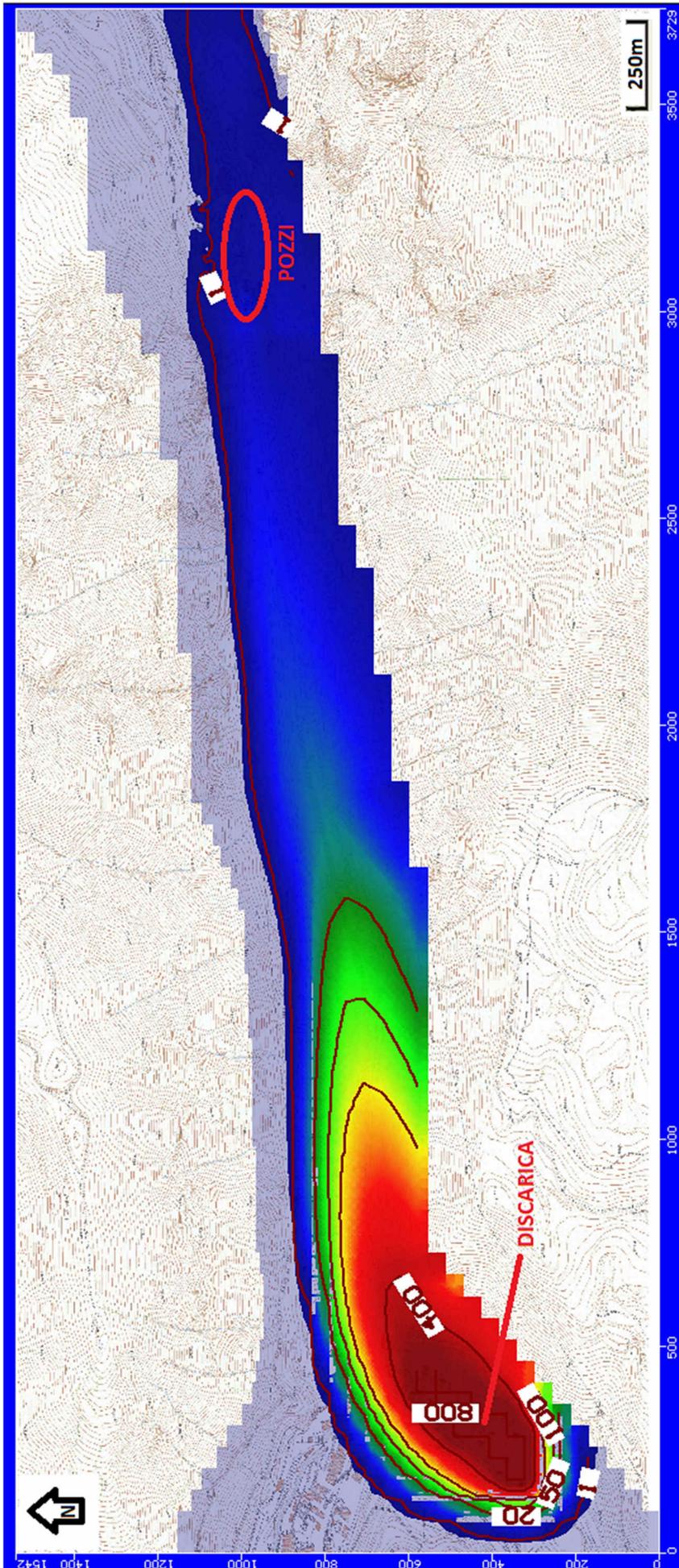


Figura 42: output
dopo 30 anni;
concentrazioni
espresse in $\mu\text{g/L}$.

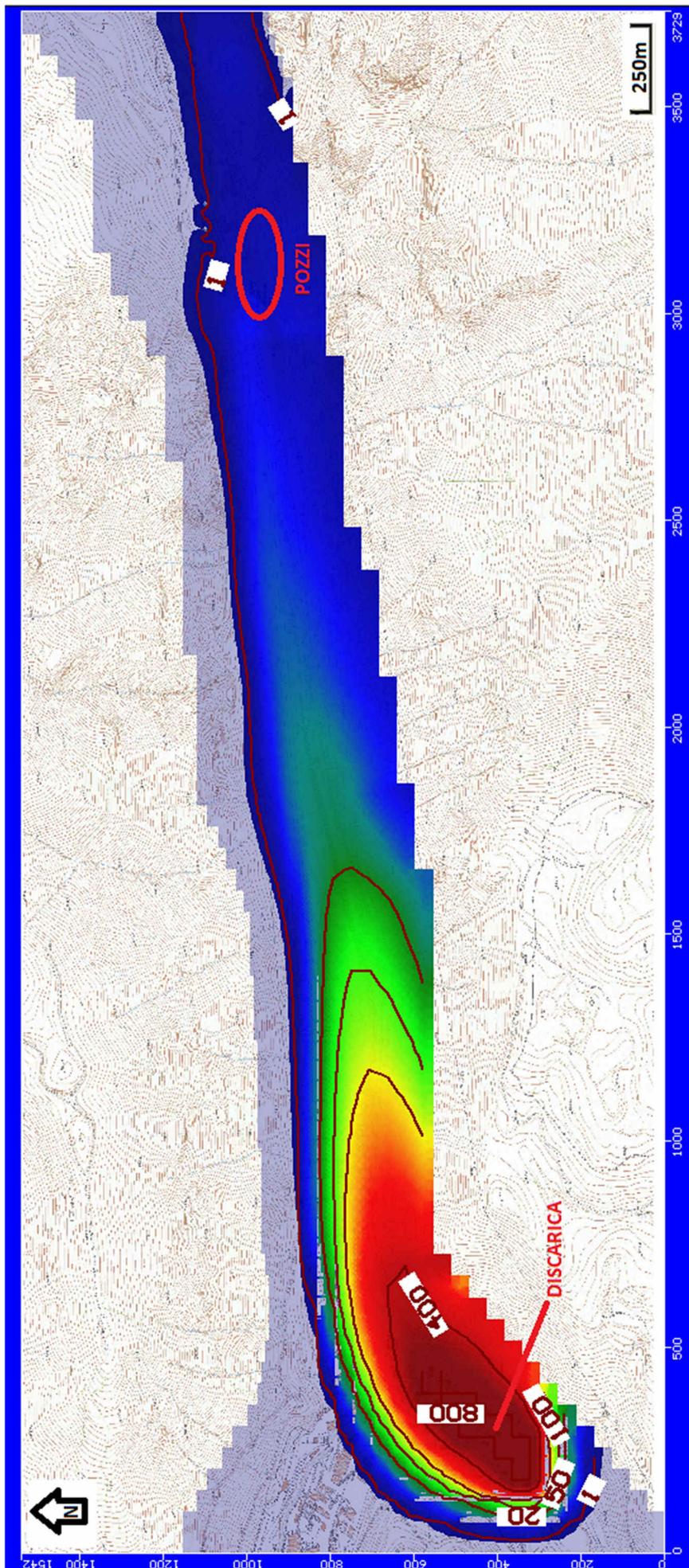


Figura 43: output
dopo 40 anni;
concentrazioni
espresse in $\mu\text{g/L}$.

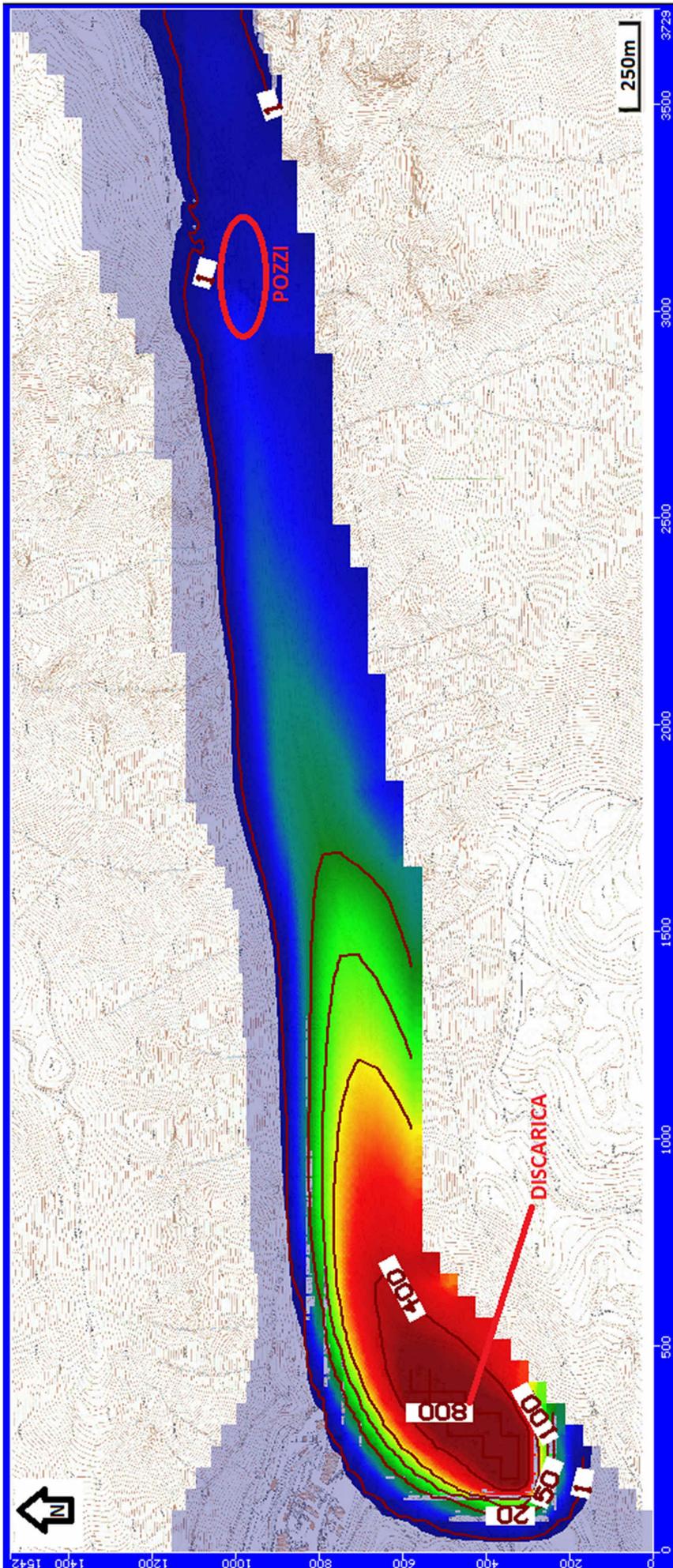


Figura 44: output dopo 49 anni, al termine della modellazione;
concentrazioni espresse in µg/L.

11.4 Presentazione dei risultati

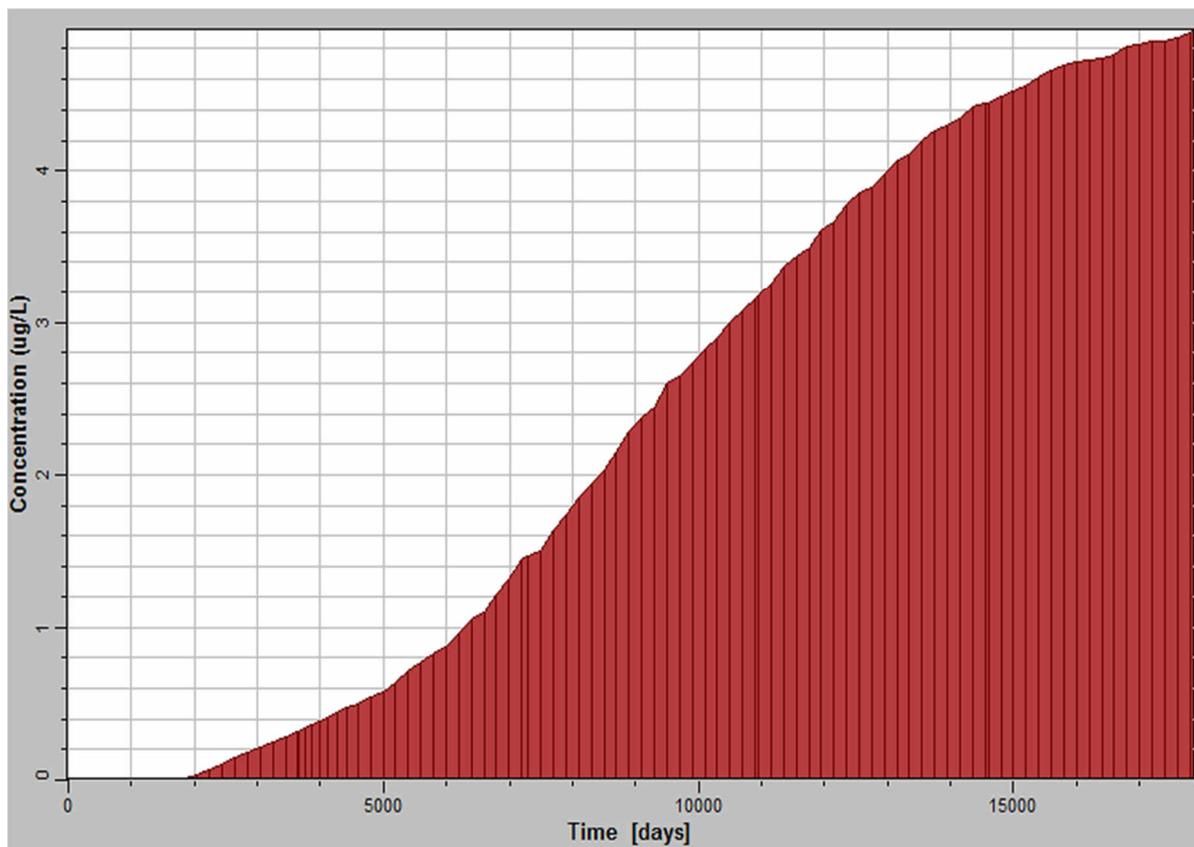


Figura 45: andamento della contaminazione da PCE nel tempo nell'area del campo pozzi di Colle Sant'Angelo.

Osservando i risultati (Figure da 38 a 45) si può stabilire che la contaminazione da PCE ha iniziato a giungere all'area del Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo dopo circa 2400 giorni, alla concentrazione di 0,1 µg/L, nel corso dell'anno 1970, dopo circa 7 anni dall'inizio dello sversamento.

Successivamente, ha superato la CSC di 1,1 µg/L (D.lgs. 152/06) a 6500 giorni, nel 1981, a quasi 18 anni dall'apertura della discarica, tuttavia suddetto decreto non era ancora in vigore.

Nel corso del 1990, dopo circa 9800 giorni, la concentrazione ha superato 2,7 µg/L.

Infine, l'accumulo è proseguito fino a raggiungere 5 µg/L nel 2012, dopo 49 anni, al termine del periodo di modellazione.

Il valore calcolato è compatibile con le analisi effettuate presso il Campo Pozzi durante le indagini del 2012, che indicavano una concentrazione approssimativamente di 5 µg/L di PCE, pertanto è lecito supporre che uno sversamento di 800 µg/L, stimato dal modello, per una durata complessiva di 49 anni, sia verosimile.

12. CONCLUSIONI

Dalla modellazione effettuata, emerge senza alcun dubbio che nella discarica abusiva Tre Monti sono state smaltite sostanze contaminanti molto pericolose, quali gli idrocarburi clorurati, a cui appartiene il PCE, soggetto del modello di trasporto.

Osservando il modello di flusso si può notare come le Gole di Popoli abbiano un forte potere diluitivo; questo ha fortunatamente evitato che la contaminazione del Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo fosse di entità paragonabile agli sversamenti operati senza alcuno scrupolo.

È emerso che ci siano voluti circa 7 anni perché tracce del tetracloroetilene pervenissero presso l'area dei pozzi e 49 anni per arrivare ad una concentrazione di 5 ug/L.

Le concentrazioni pervenute al campo pozzi sono decisamente inferiori rispetto all'entità degli sversamenti, stimati a 800 mg/L per i 49 anni presi in esame.

Tuttavia, la CSC del tetracloroetilene, secondo il D.lgs. 152/06, è fissata a 1,1 µg/L, quindi per quanto ci si possa ritenere fortunati grazie al potere diluitivo della valle, si parla comunque di concentrazioni di quasi cinque volte oltre la soglia stabilita dalla legge.

Diverso è il discorso relativo alla discarica, per la quale sono stati realizzati provvedimenti per la messa in sicurezza provvisoria, ma tali azioni sono state solamente superficiali, per impedire che la pioggia, infiltrandosi, favorisse il percolare delle sostanze nocive.

Infatti, il fondo della discarica si trova a diretto contatto con il substrato geologico permeabile e continua a perdere sostanze pericolose, impregnando in particolar modo il travertino.

Quindi, in assenza di ulteriori provvedimenti, la contaminazione è destinata a continuare anche in futuro ed i valori rilevati ai pozzi sono destinati a crescere.

Anche qualora venisse arrestata la perdita di sostanze dal fondo della discarica, ormai nel sistema è stato immesso un quantitativo tale di contaminanti, che passerebbe un tempo comunque molto lungo perché la situazione possa rientrare alla normalità.

Pertanto, è verosimile supporre che il Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo, chiuso dal 2007, non verrà mai più riaperto in futuro.

Invece, dal punto di vista della salute umana, è lecito supporre che tutti coloro che abbiano usufruito dell'acqua potabile del sopraccitato campo pozzi, a partire dagli anni '70, fino alla sua chiusura, abbiano ingerito quantitativi significativi di tetracloroetilene e probabilmente anche altri composti.

Considerato che il Campo Pozzi di Colle Sant'Angelo serviva buona parte della città di Pescara, si invita a riflettere sulle ripercussioni che simili azioni possono avere. Per colpa di pochi, molti hanno pagato il prezzo con la loro salute, restando ignari di tutto, per lungo tempo.

Con una sentenza del Tribunale d'Appello dell'Aquila, dello scorso 17 febbraio 2017, è stato riconosciuto il reato di avvelenamento d'acqua colposa aggravato oltre al reato ambientale colposa aggravato.

BIBLIOGRAFIA

- ARTA ABRUZZO, 2007. Attività di indagine ambientale nell'area compresa tra la confluenza Tirino-Pescara e il Campo Pozzi Colle Sant'Angelo. Caratterizzazione geologica ed idrogeologica; aggiornamento Luglio 2007". Relazione Generale e tavole allegate.
- BEAR J., 1972. Dynamics of fluids in porous media, New York.
- BIGI S., CALAMITA F. & CENTAMORE E., 1995. Caratteristiche geologico-strutturali dell'area abruzzese ad oriente del Gran Sasso. Studi Geol. Camerti, 2, pp 67-76.
- BONI C. & PETITTA M., 1994. Sorgenti lineari e valutazione dell'infiltrazione efficace in alcuni bacini dell'Italia centrale. Quaderni di Geologia Applicata, 1, pp 99-113.
- BONI C., 1973. Lineamenti idrogeologici dell'Appennino carbonatico laziale-abruzzese (primi risultati della campagna 1970-1972). Atti del 2° Convegno internazionale sulle acque sotterranee, Palermo.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G., 1986. Schema idrogeologico dell'Italia centrale. Mem. Soc. Geol. It, vol. 35, pp 991-1012.
- BOSELLINI G., 2005. Storia geologica d'Italia. Gli ultimi 200 milioni di anni, Zanichelli.
- CALAMITA F. & PIZZI A., 2006. Geologia Strutturale. In: CENTAMORE E., CRESCENTI U. & DRAMIS F. (a cura di) "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000; Foglio 369 Sulmona. APAT-Regione Abruzzo.
- CARACCILO S., 1972. Il contenuto in mercurio totale del muscolo di pesci e di altri prodotti alimentari della pesca catturati nel Mare Adriatico ed in alcuni fiume e laghi dell'Italia centrale. Istituto sperimentale per l'igiene e controllo veterinario della pesca.
- CARRARA C., 1998. I travertini della valle del Pescara tra Popoli e Tor de'Passeri (Abruzzo, Italia centrale). Il Quaternario, 11 (2), pp 163-178.
- CAVINATO G.P. & MICCADEI E., 1995. Sintesi preliminare delle caratteristiche tettoniche e sedimentari dei depositi quaternari della Conca di Sulmona (L'Aquila). Il Quaternario, 8 (1), pp 129-140.
- CELICO P., 1983. Carta idrogeologica dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionale, Abruzzo, Molise e Campania) alla scala 1:400.000. Cassa per il Mezzogiorno, Grafiche Magliana, Roma.
- CENTAMORE E., CRESCENTI U. & DRAMIS F., 2006a. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 369 Sulmona. APAT, Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico d'Italia, p 170.
- CENTAMORE E., CRESCENTI U. & DRAMIS F., 2006b. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 360 Torre de'Passeri. APAT, Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico d'Italia, p 175.
- CERICOLA CARLO, 2007. Lavori di indagini conoscitive al fine di verificare l'esistenza, la consistenza e la diffusione di sostanze inquinanti nel sottosuolo presso la località "Bussi officine" nel comune di Bussi sul Tirino. Committente: Procura della Repubblica di Pescara.

- CINQUE A. & MANCINI A., 2009. Consulenza tecnica idrogeologica sulla contaminazione in atto nell'area della zona industriale di Bussi nella gola di Popoli. Procura della Repubblica presso il Tribunale di Pescara. Procedimento penale n. 12/2006 R.G.N.R. mod.U.
- COLACICCHI R., 1967. Geologia della Marsica orientale. Geologica Romana, p 7.
- COLOMBO F., 2009. Prima ricostruzione dell'inquinamento on site e off site della zona di Bussi riferibile alla gestione Montedison S.p.A sulla base dei documenti recentemente reperiti in un archivio storico a Spinetta Marengo (AL).
- COLTORTI M. & DRAMIS F., 1988. The significance of stratified slope waste deposits in the Quaternary of the Umbria Marche Appennines (Central Italy).Zeit. Geom. N.F. Suppl. Bd. 71, 59-70.
- COLTORTI M. & DRAMIS F., 2006. Depositi continentali. In: CENTAMORE E., CRESCENTI U. & DRAMIS F. (a cura di) "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000; Foglio 369 Sulmona. APAT - Regione Abruzzo.
- CONESE M., NANNI T., PEILA C., RUSI S. & SALVATI R., 2001. Idrogeologia della Montagna del Morrone (Appennino Abruzzese): dati preliminari. Mem. Soc. Geol. It., 56, pp 181-196.
- D'ANDREA M., MICCADEI E., PRAUTURLON A., 1991. Rapporto tra il margine orientale della piattaforma laziale-abruzzese e quello occidentale della piattaforma Morrone-Pizzalto-Rotella. Studi Geol. Camerti, 1991/2, pp 389-395.
- DARCY H., 1856. Dètermination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable. In: Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Paris, pp 590-594.
- DEMANGEOT J., 1965. Geomorphologie des Abruzzes Adriatiques. Memoires et Documents, C.N.R. S., Paris, p 403.
- DEMANGEOT J., 1973. Néotectonique et dépôts quaternaires dans l'Apennin. In: "Moderne vedute sulla geologia dell'Appennino", Acc. Naz. Dei Lincei, Quaderno 183, pp 215-240.
- DESIDERIO G., NANNI T. & RUSI S., 2001. La pianura alluvionale del fiume Pescara (Abruzzo): idrogeologia e vulnerabilità dell'acquifero. Mem. Soc. Geol. It., p 56, pp 197-211.
- DI MOLFETTA A. & FRACASSI F., 2008. Consulenza tecnica sulla contaminazione in atto nell'area del polo industriale di Bussi. Per la Procura della Repubblica presso il Tribunale di Pescara, Proced. 12/2006. p 156.
- E&G S.r.l., 2010a. Indagini per la verifica degli interventi di Messa in sicurezza di emergenza del sito in località "I Tre Monti" nel Comune di Bussi sul Tirino (PE) - Commissario delegato per l'emergenza del Fiume Aterno Pescara.
- E&G S.r.l., 2010b. Messa in Sicurezza permanente di un sito contaminato nel Comune di Bussi sul Tirino (PE) – Il Commissario delegato per l'emergenza del fiume Aterno.
- E&G S.r.l., 2011. Messa in sicurezza di emergenza del sito in località "I Tre Monti" nel Comune di Bussi sul Tirino (PE) - Commissario Delegato per l'emergenza del Fiume Aterno Pescara.
- E&G S.r.l., 2014. Bonifica del sito di interesse nazionale di nel Comune di Bussi sul Tirino (PE) Aree esterne stabilimento Solvay – I° stralcio- Commissario Delegato per l'emergenza del Fiume Aterno Pescara.
- ENSR ITALIA, 2001. Piano di caratterizzazione del sito Solvay Solexis di Bussi sul Tirino.

- ENSR ITALIA, 2004. Risultati dell'Integrazione del Piano di Caratterizzazione del sito Solvay Solexis di Bussi sul Tirino (PE).
- FRANCANI V., PETITTA M. & COLOMBO F., 2012. Relazione tecnica sulla contaminazione dell'area industriale di Bussi e del campo pozzi Sant'Angelo.
- GEOTECNICA RICCI S.r.l., 2007. Indagini geognostiche per la caratterizzazione idrogeologica dell'area compresa tra il fiume Tirino (Pescara) ed il Campo Pozzi Colle Sant'Angelo.
- GHISSETTI F. & VEZZANI L., 1983. Deformazioni pellicolari mioceniche e plioceniche nei domini strutturali esterni dell'Appennino centro-meridionale (Maiella ed arco Morrone Gran Sasso). Mem. Soc. Geol. It., 26.
- GHISSETTI F. & VEZZANI L., 1988. Rapporti strutturali tra il fronte del Gran Sasso ed il Flysch della Laga (Appennino Centrale). Mem. Soc. Geol. It., 41, pp 1171-1178.
- GIULIANI R. & SPOSATO A., 1995. Evoluzione quaternaria del sistema di depressioni del Tirino (Appennino abruzzese). II Quaternario, 8 (1), pp 217-228.
- GOIO. A., 2014. Piano delle indagini integrative sul sito in località "I Tre Monti" nel comune di Bussi sul Tirino; Relazione Tecnica.
- HABETSWALLNER F., PALOZZO W. & CELICO P. B., 2008. Piano di tutela delle acque per la Regione Abruzzo; Relazione idrogeologica, Regione Abruzzo.
- ISPRA, 2009. Procedimento penale n.12/06 R.G.N.R. (tribunale di Pescara). Valutazione di impatto ambientale.
- ISS-ISPELS, 2009. Tabelle delle proprietà chimico fisiche e tossicologiche delle specie chimiche inquinanti elencate in Tabella 1 dell'Allegato 5 al Titolo V Parte Quarta del D.lgs. 152/06.
- ISTAT, 2015. Giornata mondiale dell'acqua, statistiche dell'ISTAT. Comunicato stampa di venerdì 20 Marzo 2015.
- KEARY P. & VINE J.V., 1994. Tettonica globale, Zanichelli.
- LOMBARDO M., CALDERONI G., D'ALESSANDRO L. & MICCADEI E., 2001. The travertine deposits of the upper Pescara valley (Central Abruzzi, Italy): a clue for the reconstruction of the late Quaternary evolution of the area.
- MAJONE M., VERDINI R., FACCHINELLI V., MANCINI S., 2015. Presenza e comportamento dei solventi clorurati. Analisi e promozione di nuove tecnologie di bonifica e di caratterizzazione dei siti contaminati, Allegato A2. Regione Lombardia, Milano, p 172.
- MASSOLI-NOVELLI R., PETITTA M. & SALVATI R., 1998, La situazione idrogeologica e ambientale delle Gole di Popoli (Abruzzo): primi risultati e prospettive di ricerca. Mem. Soc. Geol. It., 53, pp 563-584.
- MCCARTHY J.F., & ZACHARA J.M., 1989. Subsurface Transport of Contaminants, Environ. Sci. Technol., 5(23), pp 496-502.
- MCDONALD G. & HARBAUGH A.W., 1989. A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model, USGS Techniques of Water Resource Investigations, Washington DC.
- MICCADEI E., BARBERI R., CAVINATO G.P., 1998. La geologia della Conca di Sulmona (Abruzzo, Italia Centrale). Geologica Romana, 34, pp 59-86.

- MOSTARDINI F. & MERLINI S., 1986. Appennino centro-meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale. Mem. Soc. Geol. It., 35: pp 177-202.
- NAPOLEONI Q., DE CATERINI G. & ZAFFIRO P., 2010. Progetto per la messa in sicurezza d'emergenza del sito in località "I Tre Monti" nel comune di Bussi sul Tirino.
- PATACCA E., SCANDONE P., BELLATALLA M., PERILLI N. & SANTINI U., 1992. La zona di giunzione tra l'arco appenninico settentrionale e l'arco meridionale nell'Abruzzo e nel Molise. Studi Geol. Camerti, vol. 1991/1992, pp 417-441.
- PERRONE E., 1901. Aterno-Pescara. Memorie descrittive della Carta Idrogeologica d'Italia. Min. Agr. Ind. Comm. Artig., Roma, pp 1-257.
- PETITTA M. & TALLINI M., 2002. Idrodinamica sotterranea del massiccio del Gran Sasso (Abruzzo): nuove indagini idrologiche, idrogeologiche e idrochimiche (1994-2001). Boll. Soc. Geol. It., 121, pp 343-363.
- PETITTA M. & TALLINI M., 2007. Relazione geologico strutturale della bassa valle del fiume Tirino.
- PETITTA M., SALVATI R., STIGLIANO P., MASSOLI NOVELLI R., MICCADEI E., BARBERI R., DE CATERINI G. & PIACENTINI T., 1997. Studi per il monitoraggio idrologico del massiccio del Gran Sasso (Abruzzo). 2) Nuovi dati per la definizione dell'assetto Idrogeologico-strutturale. Geotalia '97, Rimini, 5-9 ottobre 1997, 2, pp 359-361.
- PETITTA M., TALLINI M., 2002. Idrodinamica sotterranea del massiccio del Gran Sasso (Abruzzo): nuove indagini idrologiche, idrogeologiche e idrochimiche (1994-2001). Boll. Soc. Geol. It., 121, pp 343-363.
- POILLUCCI et al., 2007. Attività di indagine ambientale nell'area compresa tra la confluenza Tirino-Pescara e il campo pozzi "Colle S. Angelo". Caratterizzazione geologica e idrogeologica. Aggiornamento Luglio 2007.
- RADMILLI A. M., 1984. Le Svolte di Popoli. Abruzzo. In: "I primi abitanti di Europa". De Luca Ed., pp 141-143.
- RUSI S., 2007. Relazione idrogeologica sul campo pozzi Sant'Angelo (Castiglione e Casauria-Torre dei Passeri).
- SANTAMARIA L. & BOLOGNESI D., 2007. Memorie nell'interesse della persona offesa SOLVAY S.A. ex art. 90 c.p.p. nel procedimento penale n. 12/06 R.G.N.R.
- SPITZ K. & MORENO J., 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling.
- STIGLIANO P., ALTIERI A., BARBERI R., DE CATERINI G., MASSOLI NOVELLI R., MICCADEI E., PIACENTINI T., PETITTA M. & SALVATI R., 1999, - Studi per un monitoraggio idrogeologico del massiccio del Gran Sasso (Abruzzo). Studi Geol. Camerti, vol. 1999, pp 153-170.
- SYLOS LABINI S., BAGNAIA R. & D'EPIFANIO A., 1993. Il Quaternario del bacino di Sulmona (Italia Centrale). Quaternaria Nova, 3, pp 343-360.
- VEZZANI L. & GHISSETTI F., 1998. Carta geologica dell'Abruzzo, a scala 1: 100.000. S.EL.CA., Firenze.
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC, 2015. Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual For Professional Applications in Three-Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling.