ALLEGATO 14

Modellazioni numeriche finalizzate alla verifica della compatibilità ambientale del campo pozzi Ilva di Genova Cornigliano in relazione alle problematiche di intrusione del cuneo salino

STUDIO GEOTECNICO ITALIANO srl
ingegneria geotecnica - ingegneria sismica - ingegneria ambientale
geologia applicata

ILVA

STABILIMENTO DI GENOVA CORNIGLIANO

STUDIO GEOTECNICO ITALIANO S.r.l.
Dott. Ing. Valeriano Pastore
Iscrizione Albo degli Ingegneri
Provincia di Milano
N. 22123

GENOVA

CAMPO POZZI ILVA

Modellazioni numeriche finalizzate alla verifica della compatibilità ambientale del campo pozzi Ilva di Genova Cornigliano in relazione alle problematiche di intrusione del cuneo salino

08619-013R02-DEL-GIU-TES/gg

Emissione	Data	Redatto	Controllato	Approvato
E01	29/01/2015	Giuseppe Giuva Stefano Testori	Andrea Del Frate	Valeriano Pastore

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

I N D I C E

1. INTRODUZIONE 1

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO 3

2.1 Bibliografia 3

2.2 Norme 4

3. DATI DI INPUT 6

3.1 Dominio di studio - generalità 6

3.2 Dati di base per la strutturazione del modello tridimensionale 10

3.3 Dati piezometrici 11

3.4 Precipitazioni 13

3.5 Caratteristiche idrogeochimiche dell'acquifero: stato attuale della qualità delle acque di falda. 16

3.6 Caratteristiche chimiche dell'acqua di mare 21

3.7 Caratteristiche geologiche, stratigrafiche ed idrogeologiche dell'area oggetto di modellazione 21

4. ANALISI DEL REGIME DI FLUSSO E DEL TRASPORTO CON DENSITA' DEL FLUIDO VARIABILE 23

4.1 Generalità 23

4.2 Aspetti teorici di base 23

5. STRUTTURA E CARATTERISTICHE DEL MODELLO NUMERICO TRIDIMENSIONALE 30

5.1 Descrizione del codice di calcolo 30

5.2 Caratteristiche geometriche del modello numerico 31

5.3 Distribuzione dei parametri idrogeologici 34

6. CONDIZIONI AL CONTORNO PER IL FLUSSO 39

6.1 Limiti a potenziale imposto 39

6.2 Condizioni al contorno di monte idrogeologico 39

6.3 Condizioni al contorno in corrispondenza del torrente Polcevera 40

6.4 Condizioni al contorno in corrispondenza della linea di costa 42

6.5 Altre condizioni al contorno 43

7. CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO 44

7.1 Criterio di calibrazione dei parametri di conducibilità idraulica 44

7.2 Calibrazione del modello in stato stazionario 45
7.3 Calibratura del modello in stato transitorio – Ricostruzione della prova di pompaggio 49
7.4 Simulazione del trasporto di soluti. 52
8. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI PROVENIENTI DALL'EMUNGIMENTO PROLUNGATO OPERATO DAL CAMPO POZZI ILVA 55
8.1 Generalità 55
8.2 Risultati delle simulazioni 55
9. CONCLUSIONI 60

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

1. INTRODUZIONE

Il presente documento costituisce la Relazione di sintesi sulla modellazione numerica realizzata nell'ambito della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale presentata da ILVA SpA finalizzata all'ottenimento del rinnovo della concessione di estrazione di acque dal sottosuolo mediante campo pozzi di proprietà per un totale di 600 l/s necessari alle produzioni di stabilimento (cfr.).

Attualmente la concessione in capo ad ILVA SpA prevede la derivazione di 8,5 moduli (1 modulo = 100l/s per complessivi 850l/s). Tali acque sono estratte dal sottosuolo esclusivamente per uso industriale (per la maggior parte sono utilizzate nel raffreddamento) all'interno degli impianti ILVA di Cornigliano.

Nell'ambito della richiesta di spostamento di due pozzi del campo (i pozzi esistenti P4 e P7) e relativo riordino del catasto delle concessioni, la Regione Liguria ha richiesto una revisione dell'intera concessione ILVA da presentarsi assieme ad una Valutazione di Impatto Ambientale relativa al campo pozzi. Successivamente solo il pozzo P4 è stato spostato in posizione limitrofa (pozzo P4Bis).

Uno degli aspetti che si è ritenuto di valutare nella VIA è quello dell'intrusione del cuneo salino ad opera dell'esercizio complessivo del campo pozzi Ilva per la nuova portata.

L'intrusione del cuneo salino si determina naturalmente in corrispondenza delle linee di costa ed può diventare rilevante laddove, nell'entroterra prossimo al mare, si operino emungimenti delle falde tali da ridurre il battente di acqua dolce sullo strato di acqua salina, andando così ad alterare la cosiddetta zona di transizione tra l'acqua della falda acquifera (dolce) e quella del mare (salata).

La condizione di intrusione del cuneo salino può diventare critica in occasione della stagione di magra della falda in cui il livello di acqua dolce viene naturalmente a diminuire.

Al fine di valutare l'impatto degli emungimenti del campo pozzi Ilva in relazione al problema dell'intrusione salina è stato realizzato un modello numerico tridimensionale di flusso e trasporto con il quale è stato determinato il range sostenibile di portate emungibili dal sistema campo pozzi Ilva che risultasse anche compatibile con le necessità produttive dello stabilimento di Cornigliano.

Per determinare tale range sono state eseguite simulazioni in stato transitorio con la finalità di ricostruire uno scenario di distribuzione dei soluti salini nelle acque di falda

ragionevolmente vicino alla situazione reale ed introdurre l'elemento di pressione (l'emungimento dal sistema di pozzi Ilva) tale da non alterare tale stato.

In parallelo alle elaborazioni numeriche sono state effettuate delle misure del grado di salinità in corrispondenza dei pozzi del campo Ilva e di alcuni piezometri vicini. Gli esiti di tali determinazioni sono stati utilizzati nell'analisi generale condotta.

Nel seguito verranno illustrate le attività di reperimento e gli esiti d'analisi dei dati disponibili per la definizione del dominio del modello numerico realizzato.

Successivamente verrà illustrata la struttura del modello, la sua calibrazione sia in stato stazionario che transitorio e, infine, verranno presentati i risultati delle simulazioni relative agli impatti dell'azione del campo pozzi ILVA.

Nel seguito sono presentati i dati di base utilizzati per la definizione del modello numerico e la sua implementazione mediante il software Feflow 6.2 (WASY).

Successivamente sono presentati i risultati della modellazione relativamente a varie condizioni (tipicamente di grassa e di magra del torrente Polcevera) e le conclusioni tratte in merito al valore della portata di concessione.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Nel seguito si riportano i documenti cui si è fatto riferimento per la redazione della presente relazione.

2.1 Bibliografia

[1] Spitz-Moreno – A practical gide to groundwater and solute transport modeling

[2] H.-J. G. Diersch Wasy Software – Feflow – Reference manual

[3] H.-J. G. Diersch – Feflow – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media – ed. Springer

[4] Metcalf & Eddy – Wastewater engineering – treatment and reuse.

[5] Database contenente dati idrogeochimici della rete di monitoraggio della falda ricevuto da Arpal

[6] Database geologico stratigrafico della regione Liguria ricevuto d Arpal

[7] I. E. Uwidia1, H.S. Ukulu - Studies on electrical conductivity and total dissolved solids concentration in raw domestic wastewater obtained from an estate in Warri, Nigeria - Greener Journal of Phisycal Sciences

[8] C. Fitts - Groundwater Science, 2nd Edition – Academic Press

[9] Sito ufficiale della Regione Liguria per l'ambiente. http://www.ambienteinliguria.it.

[10] Provincia di Genova - Piano di Bacino Stralcio sul bilancio idrico - Il bacino del torrente Polcevera. 14/04/2009.

[11] "Applied Groundwater modelling – simulation of flow and advective transport" M.P. Anderson, W.W. Woessner, 1992, Academic Press.

[12] "Methods and guidelines for effective model calibration: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report", 98-4005, 90 p., Hill, M.C., (1998).

[13] "Problems with large-scale modeling of salt water intrusion in 3D", G.H.P. Oude Essink e R.H. Boekelman, 14th Salt Water Intrusion Meeting, Malmo, Sweden, 288-299, 1996.

[14] "Modeling groundwater flow and pollution" J. Bear, A. Verruijt, 1990, D. Reidel Publishing Company

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

[15] "Simulation of Ground-Water discharge to Biscayne Bay, Southeastern Florida", C.D. Langevin, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4251, 2001.

[16] "Coupled and partially coupled eulerian-lagrangian model of freshwater-seawater mixing", G. Galeati, G. Gambolati e S.P. Neuman, Water Resources Research, vol. 28(1), 149-165, 1992.

[17] "FEFLOW – White Papers, Vol. 1", WASY, 2002

[18] "Dynamics of fluids in porous media" J. Bear, 1972, Elsevier

[19] "Head and flow of ground water of variable density", N.J. Lusczynski, Journal of Geophysical Research, vol. 66(12), 4247-4256, 1961.

2.2 Norme

[20] D.Lgs. 3 aprile 2006, N. 152: "Norme in materia ambientale" e s.m.i.

[21] Legge regionale 30 dicembre 1998 n. 38 "Disciplina della valutazione di Impatto Ambientale"; Bollettino ufficiale regionale 20/01/1999 n. 1.

[22] "Aggiornamento delle norme tecniche in materia di VIA. Derivazioni idriche e sonde geotermiche: precisazioni circa le condizioni di assoggettamento alla verifica screening e definizione delle indagini geologiche ed idrogeologiche da fornire a supporto della documentazione di VIA" – Regione Liguria – Dipartimento Ambiente.

[23] Regione Liguria – Dipartimento Ambiente – Settore Valutazione Impatto Ambientale Aria e Clima - Procedura di verifica Screening – Progetto per la terebrazione di due nuovi pozzi per la ricollocazione delle opere di presa ILVA S.p.A. n. 7 e n. 4 in località Campi Comune di Genova – Proponente Ilva S.p.A. – No via con prescrizioni – Prot. PG/2014/182688 - 27 Dicembre 2012.

[24] Provincia di Genova - Direzione Ambiente, Ambiti Naturali E Trasporti - Servizio Acqua E Rifiuti - Determinazione Dirigenziale - Prot. Generale N. 0086766 / 2013 - Atto N. 3811 - OGGETTO: Pratica TP/56 - Titolare: ILVA S.p.A. – PROROGA DEL TERMINE DI INIZIO LAVORI relativo alla autorizzazione di terebrazione pozzi in sub-alveo Torrente Polcevera di

cui al P.D. n° 2042 in data 09/05/2013 località per uso industriale in Comune di Genova. Domanda in data: 24/07/2013 – 02 Settembre 2013

[25] Decreto N. 4544 del 7/12/2012 del Dirigente del Settore Valutazione Impatto Ambientale Arie e Clima – Dipartimento Ambiente – Regione Liguria – Prot. N. PG/2012/182688.

[26] D. Lgs. N. 31 del 02/02/2001 - Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualita' delle acque destinate al consumo umano.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

3. DATI DI INPUT

Nel presente capitolo vengono illustrati gli elementi geologici, idrologici ed idro-geo-chimici di base utilizzati per lo studio della porzione di territorio di interesse e per la strutturazione e caratterizzazione del modello numerico tridimensionale elaborato.

In base alle finalità della modellazione, infatti, è stata scelta l'estensione del dominio del modello mentre la sua struttura è stata definita utilizzando i dati di base idrogeologici (cfr. Paragrafi successivi).

3.1 Dominio di studio - generalità

Nella seguente Figura 3-1 si riportano, con riferimento ad una recente fotogrammetria, i limiti fisici dell'area oggetto di studio corrispondenti a quelli del modello numerico realizzato.

L'area individuata corrisponde alla parte terminale dell'alveo del torrente Polcevera e comprende l'area industriale compresa tra Cornigliano e Genova Campi.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

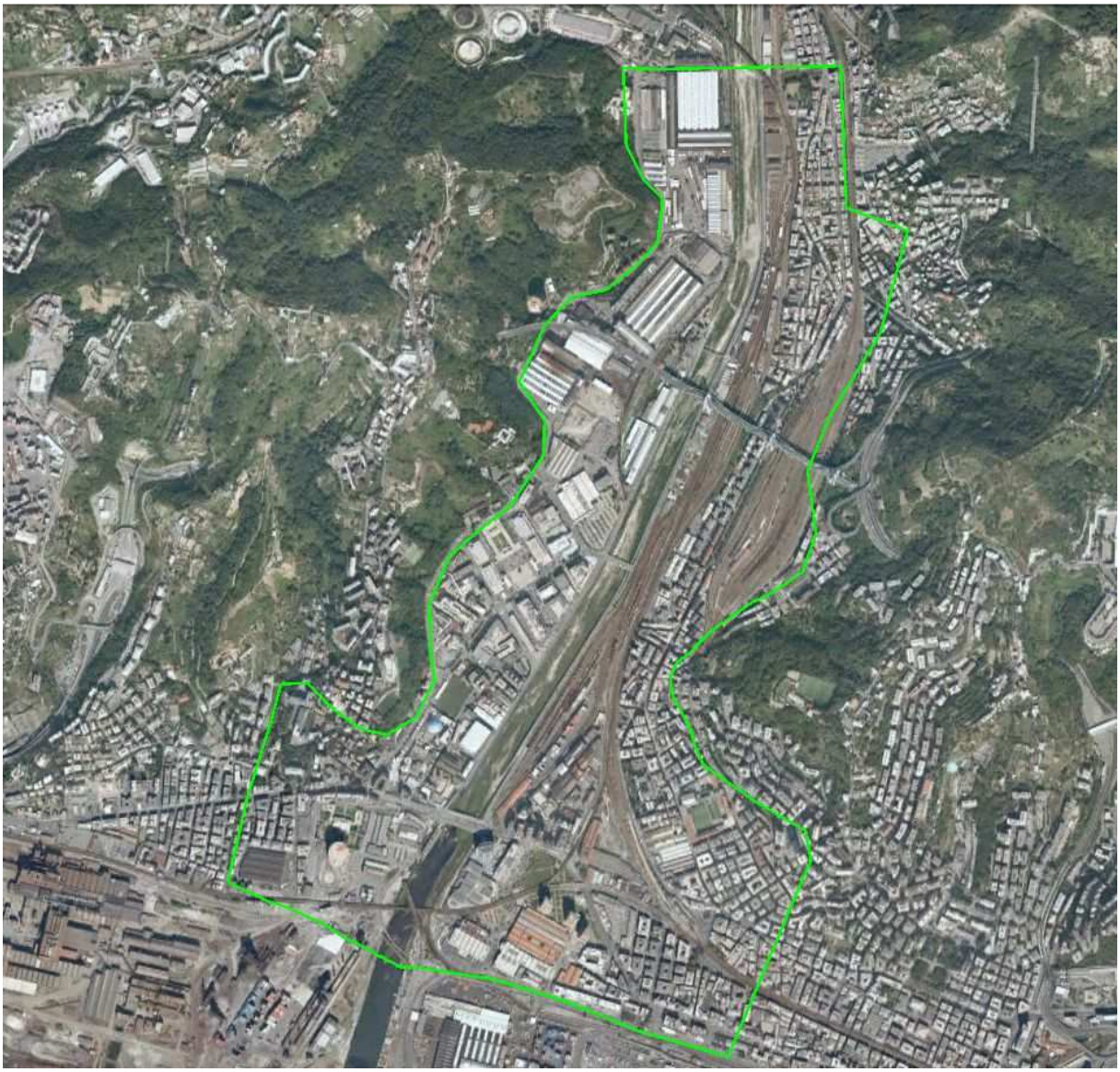


Figura 3-1 – Delimitazione dell'area fisica che costituisce il dominio del modello numerico implementato

Il campo pozzi Ilva (anch'esso oggetto delle simulazioni numeriche) si sviluppa parallelamente al corso del Polcevera per una lunghezza di circa 650 m ed interessa l'area in destra idrografica del Polcevera immediatamente adiacente all'alveo (cfr. Figura 3-2).

Il campo pozzi ricade interamente nel territorio del comune di Genova (in particolare si estende tra le frazioni di Cornigliano e Genova Campi)

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI



Figura 3-2 - Fascia di territorio in cui si ubicano i pozzi dell'attuale campo Ilva

Il campo consiste, attualmente, di cinque pozzi (cfr. Figura 3-3); in particolare il pozzo P5 è ubicato in un contesto urbanizzato abitativo/commerciale; il pozzo P6 è ubicato in corrispondenza del parcheggio a raso dello store Decathlon; Il pozzo P1Bis è ubicato in corrispondenza del parcheggio a raso dello store Ikea (totem); il pozzo P7 è ubicato nell'area privata di proprietà di Sviluppo Genova S.p.A.

Come è possibile osservare dalle fotografie aeree, l'area oggetto di modellazione numerica è costituita da tessuto urbano nella sua quasi totalità.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

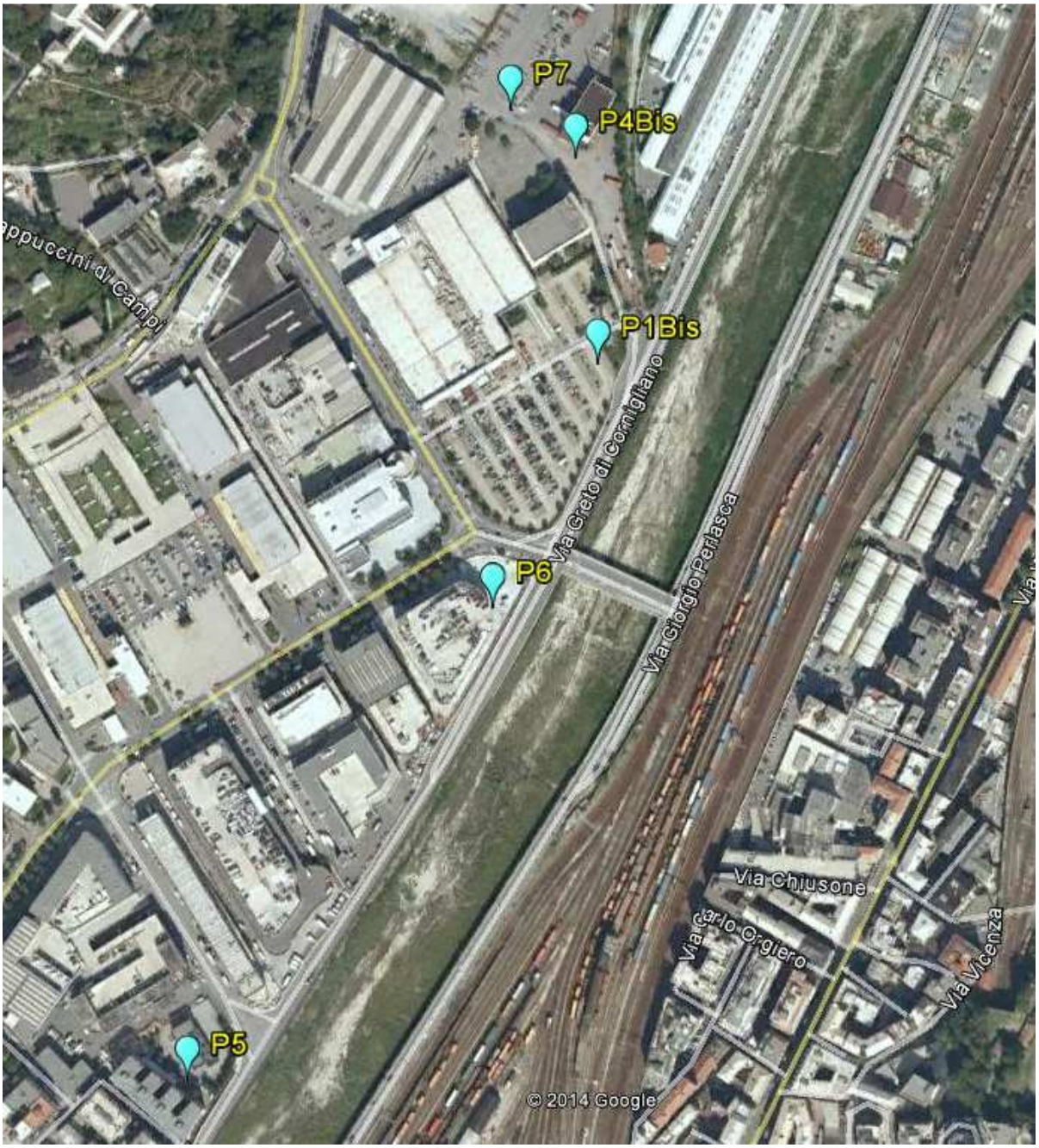


Figura 3-3 - Posizione dei pozzi del campo Ilva.

Il Nuovo pozzo P4Bis, in sostituzione del pre-esistente pozzo P4, è anch'esso ubicato nell'area di Sviluppo Genova ed è stato posizionato ad una distanza di circa 20m (direzione indicativa Est-Nord) dalla posizione del suddetto pozzo P4 pre-esistente.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

3.2 Dati di base per la strutturazione del modello tridimensionale

Per la strutturazione del modello numerico è stata condotta una ricerca dei dati di interesse con la finalità di selezionare quelli più significativi (e disponibili).
In particolare è stata condotta l'analisi di dati idrogeologici, idrogeochimici, stratigrafici ed idrografici.
La principale fonte di dati, con particolare riferimento alla struttura tridimensionale ed alle caratteristiche del modello numerico elaborato, è costituita dal materiale messo a disposizione da Arpa Liguria e costituito da:

1. alcune elaborazioni derivanti dalla modellazione numerica del tratto terminale del Torrente Polcevera. Il modello numerico elaborato da Arpal, di tipo monostrato, è caratterizzato da un'estensione maggiore del modello numerico oggetto del presente documento (risalendo più a monte lungo le valli del Polcevera). Da esso sono state mutuate le porzioni di interesse dei piani quotati del piano campagna e del bedrock (cioè lo strato di argilliti che sostiene il materasso alluvionale del Polcevera nel tratto di interesse) e dunque i limiti superiore ed inferiore del modello numerico.
   Una prima integrazione di tali dati, a livello locale all'interno dell'area comprendente il campo pozzi Ilva, è stata fatta utilizzando i dati topografici e stratigrafici relativi a stratigrafie disponibili per correggere lo spessore totale dell'acquifero rappresentato. In particolare sono state utilizzate le stratigrafie dei pozzi Ilva, le stratigrafie di alcuni sondaggi e piezometri realizzati nell'area del nuovo pozzo 4 e le stratigrafie di alcuni piezometri realizzati da Arpa (cfr ALLEGATO 9 alla relazione generale di VIA). In corrispondenza dei punti Pc1, Spz1, P7, P4. Il modello presenta uno spessore variabile da 37m ca. a 48m ca., altrove lo spessore è stato determinato, come detto, sulla base dei piani quotati forniti da Arpal.
2. Un database idrogeo-chimico (cfr. Doc. [5]) contenete i dati di monitoraggio della falda relativi a punti dislocati nel bacino del Polcevera (punti GEP).
   Di tali punti di monitoraggio solo tre (GEP01, GEP02 e GEP03) ricadono nell'area di interesse.

I dati consistono per la quasi totalità in determinazioni analitiche di parametri appartenenti a svariate famiglie di composti chimici (ad esempio i parametri riportati in tab. 2, All. 5, Tit. V, Parte IV del D.Lgs. 152/06).

3. Un database geologico-stratigrafico realizzato dalla regione (cfr. Doc. [6]). Tale database è costituito da una parte anagrafica contenente informazioni sul codice e l'ubicazione planimetrica dei punti di cui e nota la stratigrafia e la stratigrafia stessa, in formato alfanumerico. Tali informazioni sono confluite poi, assieme agli altri dati stratigrafici disponibili) nella redazione delle sezioni idrogeologiche e delle sezioni idrogeologiche schematiche di cui alle Tavole 2 a-b-c-d allegate alla relazione generale di VIA, cui si rimanda.

Anche i dati idrogeologici riportati nel piano stralcio di bacino del torrente Polcevera sono stati utilizzati (cfr. seguito) per la caratterizzazione del modello numerico.
Ulteriori dati sono stati ricavati dai siti istituzionali quali quello ambientale della regione Liguria (cfr. Doc. [9]). Si è fatto, infine, riferimento alle stesse fonti utilizzate per l'inquadramento idrogeologico della relazione generale di VIA.

3.3 Dati piezometrici

I dati piezometrici di riferimento (utilizzati per la calibrazione del modello numerico) sono costituiti da due set di dati, uno statico ed uno dinamico costituiti da dati piezometrici rilevati nel gennaio 2014 dalla rete di punti di monitoraggio disponibili (cfr. Allegato 11 alla relazione generale di VIA per l'ubicazione di tali punti) e dalle misure eseguite durante la prova di pompaggio effettuata nel settembre 2014 in corrispondenza del nuovo pozzo P4Bis (cfr. Allegato 10 alla relazione generale di VIA).
La rete dei piezometri di controllo è costituita da 9 punti di controllo distribuiti lungo il corso del Polcevera. Il rilievo del Gennaio 2014, avvenuto in presenza dei tecnici Arpal, è stato eseguito per mezzo di un freatimetro rilevando la soggiacenza della falda da piano campagna o da boccapozzo.
Sulla base delle quote assolute di testa pozzo o piano campagna sono stati determinati i valori assoluti di quota piezometrica utilizzati per la calibrazione del modello numerico.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

Nella Tabella 3-1 sono riportati i valori rilevati, le quote delle testa pozzo (o del piano campagna) e le quote assolute di falda.

Data di misura 16/01/2014					
Pozzo/Piezometro	**QUOTA PC/BP m slm**		**Soggiacenza m**	**Quota m slm**	**Note**
GEP01	12,5	pc	5,12	7,38	spento
SP13	12,84	bp	6,09	6,75	
SP16	9,2	bp	5,19	4,01	
Pozzo 6	9,75	pc	4,98	4,77	spento
Pozzo 5	7,14	pc	3,54	3,6	spento
Spz1	10,86	pc	5,7	5,16	
SP15	12,9	bp	4,32	8,58	
Spz2	9,91	pc	4,37	5,54	
Pozzo 7	10,19	pc	4,5	5,69	spento

Tabella 3-1 - Rilievo piezometrico del 16 gennaio 2014 sui punti di controllo disponibili.

I dati relativi alla prova di pompaggio del settembre 2014 sono costituiti dai dati rilevati nell'arco della prova, ai punti di controllo Pc1 e Pc2 allo realizzati allo scopo.

Per la valutazione della prova di pompaggio sono stati utilizzati anche i dati di abbassamento misurati sui punti Spz2 e pozzo P4 esistente.

Si tratta delle misure in continuo dell'abbassamento della falda durante l'entrata in funzione del nuovo pozzo P4bis per un periodo ininterrotto di 46h ca. alla portata di 105 l/s (definita sulla base degli esiti dei test a gradini da cui si è ricavato un valore di portata critica pari a 125 l/s)

Per l'analisi dei dati e la determinazione dei parametri idrogeologici si faccia riferimento alla relazione di sintesi dei risultati delle prove di pompaggio (cfr. Allegato 10 alla relazione generale di VIA). Di seguito si riportano i grafici degli abbassamenti registrati ai punti di controllo durante la prova di lunga durata (cfr. Cap. 7 successivo).

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

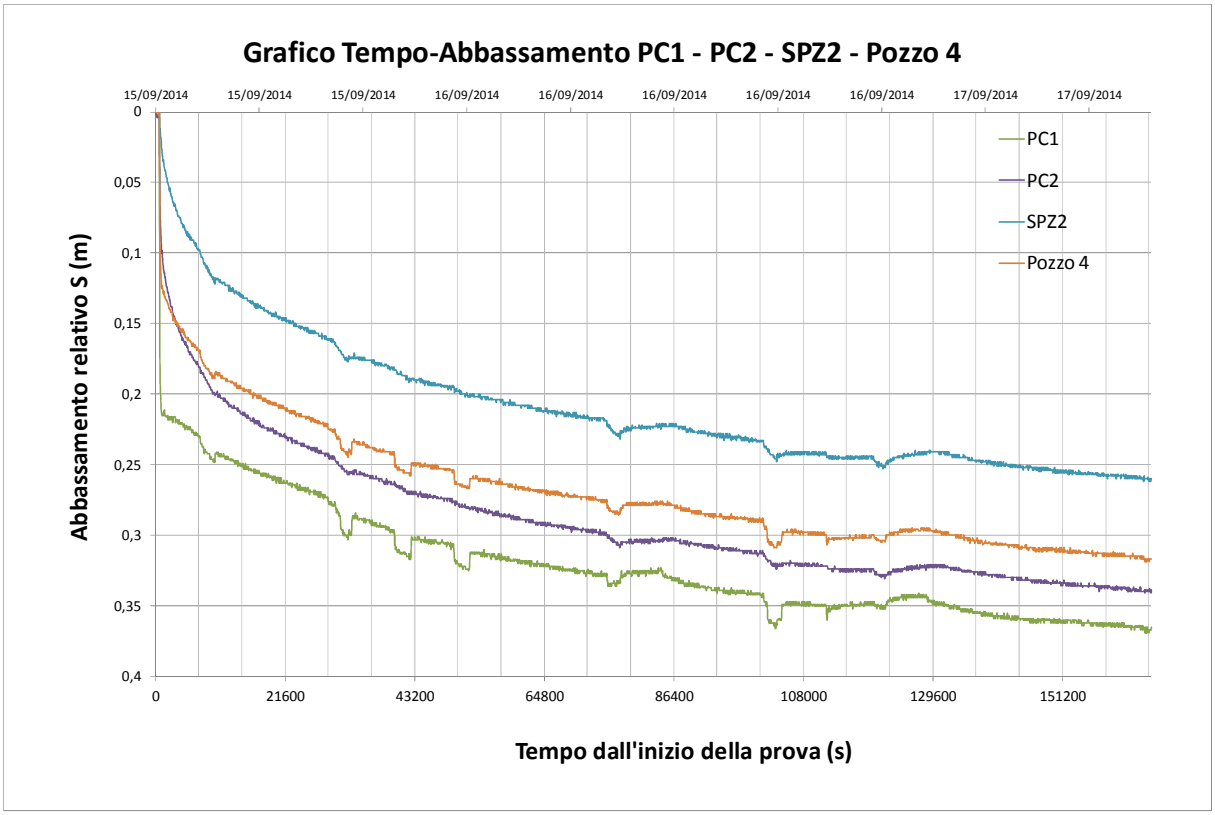


Figura 3-4 - Abbassamenti registrati ai punti di controllo durante l'esecuzione della prova di portata di lunga durate per il nuovo pozzo P4bis

Nella Tabella 3-2 si riportano i valori di riferimento per i parametri conducibilità idraulica e coefficiente di immagazzinamento utilizzati come riferimento nello sviluppo del modello numerico.

PUNTO DI CONTROLLO	T	k	Sy
Pc1	*1,86E-01*	*7,05E-03*	*5,00E-01*
Pc2	*1,66E-01*	*6,29E-03*	*4,76E-01*
SPZ2	*1,52E-01*	*5,76E-03*	*3,22E-01*
P4	*1,60E-01*	*6,07E-03*	*3,22E-01*
MEDIA	**1,66E-01**	**6,29E-03**	**4,05E-01**

Tabella 3-2 - Determinazione dei valori di conducibilità idraulica e coefficiente di immagazzinamento specifico derivanti dall'interpretazione della prova di pompaggio.

3.4 Precipitazioni

Le informazioni in merito alle precipitazioni provengono dai dati disponibili per la stazione di Genova Bolzaneto riportati nel Piano stralcio di bacino del torrente

Polcevera (cfr. Doc. [10]). Tale punto di misura risulta distare circa 2.35km dal limite di monte del dominio del modello numerico implementato. Tale stazione è caratterizzata da una quota di 47m s.l.m.

Per esso sono disponibili le serie storiche di misure mensili dal 1951 al 1989 riportate di seguito.

Anno di riferimento	genn (mm)	febb (mm)	marzo (mm)	aprile (mm)	mag (mm)	giu (mm)	lug (mm)	agosto (mm)	sett (mm)	ott (mm)	nov (mm)	dic (mm)	Pioggia annua (mm/a)	Media piogga annua (mm/a)
1951	197,4	259,1	195,4	59,8	177,2	24,7	58,1	57	106,6	222,4	893,9	100,6	2352,2	
1952	26,4	10,8	43,5	129,6	123,3	21,4	64,4	76,3	144,5	224,2	53,5	71,5	989,4	
1953	9,9	1,3	0	38,2	21,4	96,8	35,8	51,9	360,4	241,8	28,1	133,4	1019	
1954	35,6	75,6	137,7	78,3	215,7	30,9	38,4	245,7	22	137,8	304,5	220	1542,2	
1955	163,7	179,3	62,6	0	19	78,2	46,3	136,6	50,8	186,5	78,3	116,2	1117,5	
1956	113,7	2,5	243,6	160,2	23	49,9	39,9	7,6	114	80,2	82	10,7	927,3	
1957	37,2	197,3	60,2	173,9	142,9	70,3	29,7	2,6	23,4	138	472,7	229,4	1577,6	
1958	9	116	51,3	140,1	10,3	95,4	32,9	50	92,6	295	100,2	365,7	1358,5	
1959	45,4	25,4	120,1	195,9	138,8	28,7	4	66,8	108,7	475,7	174,8	449,6	1833,9	
1971	220,6	56,2	135	122,8	149,6	45,8	58,8	23,4	12,6	20,2	223,8	91,8	1160,6	
1972	136	286,4	143,4	136,4	85,4	57	35,4	24,2	171,6	267,4	82,6	180	1605,8	
1974	118,8	228,2	79	186,2	22,2	72,4	32,8	45,8	104,4	60	184	50,4	1184,2	1243,3
1975	262,6	133,4	148,2	38,6	147	28,8	2,8	127,2	68	63	298	67,8	1385,4	
1976	8,4	25,6	19,6	33	66,6	3,4	91,8	173,4	248,4	489	139,2	84,4	1382,8	
1977	304,6	nd	nd	nd	172	34,6	55,8	nd	nd	598,8	nd	nd	1165,8	
1978	273,4	210,8	111	131,2	161,8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	176,6	1064,8	
1979	nd	nd	232,8	65,4	nd	nd	nd	nd	nd	607,2	nd	nd	905,4	
1981	5,4	15,8	61,6	92,2	109,6	26	55	162,4	184,2	298,2	0,2	72,4	1083	
1982	45,6	55,2	115,8	44,8	76,2	21,6	35,6	82,6	156,4	297,4	239,8	78,8	1249,8	
1983	17,8	46,8	229,4	117,2	80,4	44,6	4,8	33,8	57,4	109,2	13,2	286	1040,6	
1984	33,8	39,4	95	57,7	189	86	0	130	77,8	109,8	214,8	85,4	1118,7	
1985	100,2	51,2	279	65,4	117,2	82,6	3,4	53	12,2	41,6	88,2	152,4	1046,4	
1986	161,2	91,8	23,1	298	129,5	79,6	23,6	nd	42,3	67	142,9	nd	1059	
1989	9,8	48,4	41,2	303,8	23,6	18,4	20,8	64	45	34,6	38,4	20,2	668,2	
Media del mese (mm)	101,6	98,0	114,3	116,0	104,4	49,9	35,0	80,7	104,9	220,2	183,5	144,9		

Tabella 3-3 - Valori mensili di pioggia disponibili al pluviometro di Bolzaneto per gli anni dal 1951 al 1989

La pioggia annua risulta essere mediamente pari a circa 1243.2 mm.

Tuttavia, è possibile ritenere i dati relativi all'anno 1951, come un dato decisamente fuori media.

Il valore media annuo , non considerando i dati del 1951, passa a circa 1195 mm per l'area di riferimento della stazione di Bolzaneto (area di studio).

I mesi di giugno luglio ed agosto risultano essere, mediamente, i meno piovosi.

Nel succitato Piano Stralcio, vengono proposte delle stime, relative al deflusso del torrente Polcevera, in cui viene fatto il confronto tra la piovosità mensile relativa all'intero bacino ed il comportamento del torrente in termini di deflusso. Si faccia riferimento alla Figura 3-5 tratta dal Doc. [10]

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

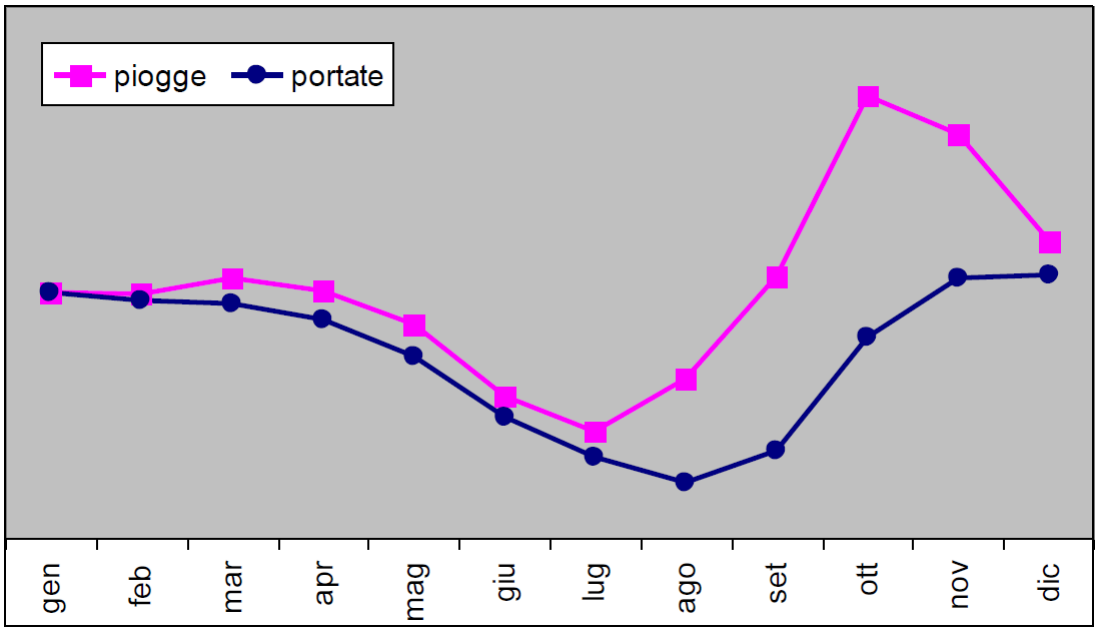


Figura 3-5 - Confronto qualitativo tra l'andamento delle piogge mensili e quello dei deflussi stimati per il torrente Polcevera.

È possibile osservare come i deflussi del torrente seguano, con una certa precisione soprattutto nei primi mesi dell'anno, l'andamento mensile delle piogge. I mesi caratterizzati da minori deflussi sono i quattro da giugno a settembre.

Per l'area di Cornigliano viene stimata una evapotraspirazione efficace di circa 432 mm/a.

L'infiltrazione efficace può essere assunta, per l'area in oggetto, praticamente nulla. Difatti, con riferimento all'area rappresentata nel modello numerico (cfr. Figura 3-1), si deve considerare che si tratta di un'area completamente antropizzata e cementificata. Si faccia riferimento, a tale proposito, all'Allegato 8 della relazione generale di VIA relativo alle permeabilità dei substrati e delle coperture quaternarie. Di fatto le coperture esistenti ed il sistema di drenaggio artificiale convogliano al Polcevera le acque meteoriche che normalmente si infiltrerebbero. La porzione di acque che possono infiltrarsi, ancorché non valutabile, può essere considerata trascurabile per l'area oggetto di modellazione.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

3.5 Caratteristiche idrogeochimiche dell'acquifero: stato attuale della qualità delle acque di falda.

Nel presente paragrafo si porrà particolare attenzione allo stato di qualità delle acque di falda nella porzione di acquifero oggetto di modellazione, con particolare riferimento alla presenza di sali disciolti, indice di contaminazione dell'acqua dolce da parte dell'acqua salmastra.

I dati disponibili per lo studio che è stato condotto, relativi a punti di campionamento interni al dominio del modello numerico, provengono da varie fonti.

In particolare sono stati utilizzati:

- il Data Base ambientale fornito da Arpal Genova contenente i dati idrogeochimici della rete di monitoraggio della falda (Cfr. Doc. [5]; punti GEP01, GEP02, GEP03; anni dal 2001 al 2012);
- Certificati analitici forniti da Ilva per alcuni punti di campionamento dell'acqua estratta dai pozzi esistenti P4 e P7 (anni dal 2008 al 2010; cfr. Allegato 13 alla relazione generale di VIA);
- Certificati analitici dei campionamenti realizzati nell'ambito degli approfondimenti di indagine richiesti dalla Regione Liguria (punti SPZ1, SPZ2, PC1, PC2, Giugno 2014; cfr. ALLEGATO 13 alla relazione generale i VIA; cfr. Doc. [25]);
- Dati raccolti direttamente in campo nel giugno 2014, mediante sonda multiparametrica (punti P5, P6, Sp16, SPZ1).

Il dataset disponibile risulta disomogeneo dal punto di vista temporale e di limitata estensione dal punto di vista spaziale, tuttavia, ha consentito di valutare lo stato qualitativo attuale e di procedere, mediante la modellazione numerica, ad una valutazione dell'influenza esercitata dall'azione del campo pozzi Ilva sul tenore di sali nell'acquifero.

Come indicatori della salinità delle acque di falda sono stati scelti i parametri conducibilità elettrica (EC) e Cloruri (Cl^-).

Il primo parametro, difatti, consente una correlazione diretta con il valore di Solidi Disciolti Totali (TDS) ed ha permesso di conferire omogeneità ai dati disponibili.

I solidi disciolti totali sono una misura degli ioni totali in soluzione. La conducibilità elettrica è una misura dell'attività ionica di una soluzione in termini di capacità di trasmettere una corrente. In soluzioni diluite, i TDS e l'EC sono ragionevolmente comparabili ed Il valore dei solidi totali disciolti in una soluzione acquosa è direttamente proporzionale alla conducibilità secondo la correlazione (cfr Docc. [4], [7] e [8]):

TDS [mg/l] ≈ CE [µS/cm] * K
dove K=(0,55÷0,70).

I cloruri, d'altra parte, sono stati adottati come tracciante per l'intrusione dell'acqua marina (caratterizzata da una concentrazione di ioni Cl^- pari a circa 20.000 mg/l).
Quando possibile, si è fatto riferimento esclusivamente ai dati più recenti disponibili.
Per quanto riguarda il punto GEP03, esso è posto in posizione adiacente al limite nord del modello, pertanto non è stato possibile utilizzarlo come punto di controllo. I dati di conducibilità relativi a tale punto sono stati, invece, utilizzati per definire il valore di concentrazione dei TDS in ingresso al dominio oggetto di modellazione.
Il valor medio di conducibilità elettrica per il punto GEP03 è risultato essere pari a 420 µS/cm da cui è stato ricavato un valore di concentrazione di solidi disciolti pari a 285 mg/l ca.
Per quanto riguarda i valori di conducibilità elettrica degli altri punti si riporta di seguito una tabella riassuntiva con i valori disponibili di conducibilità elettrica e concentrazione di cloruri.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

Punto di misura	Fonte	Data	Cl^- (mg/l)	Conducibilità elettrica (µS/cm)	TDS (mg/l)
GEP01	DB monitoraggio falda Arpal	mag-12	34,6	382	259,8
GEP01		ago-12	14,4	376	255,7
GEP02		mag-12	29,4	449	305,3
GEP02		ago-12	76,9	439	298,5
GEP03		mag-12	26	410	278,8
GEP03		ago-12	46	371	252,3
Rubinetto ILVA	Analisi periodiche ILVA	giu-10	28	482	327,8
Pozzi		dic-09	15	477	324,4
Pozzi 4/7		giu-08	18	445	302,6
Pozzi		lug-08	28	478	325,0
P5	Campagna di misura nell'ambito delle attività di caratterizzazione dell'acquifero	giu-14		420	285,6
P6		giu-14		426	289,7
SP16		giu-14		441	299,9
SPZ1		giu-14		439	298,5
SPZ1	Analisi condotte in ottemperanza alle richieste della Regione Liguria (DD Regione Liguria n.4544 - 7/12/12)	giu-14	18	381	259,1
SPZ2		giu-14	17	353	240,0
Pc1		giu-14	18	371	252,3
Pc2		giu-14	17	373	253,6

Tabella 3-4- Valori di conducibilità elettrica disponibili per alcuni punti interni all'area oggetto di modellazione numerica. Sono riportati i dati più recenti disponibili ordinati in base alla fonte di provenienza (cfr. Doc. [5] e ALLEGATO 13 alla relazione di VIA). Il valore di TDS è stato calcolato utilizzando un fattore 0.68 nella correlazione tra conducibilità elettrica e TDS.

L'ubicazione dei punti, rapportata all'estensione del dominio rappresentato nella modellazione numerica, è riportata in Figura 3-6.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

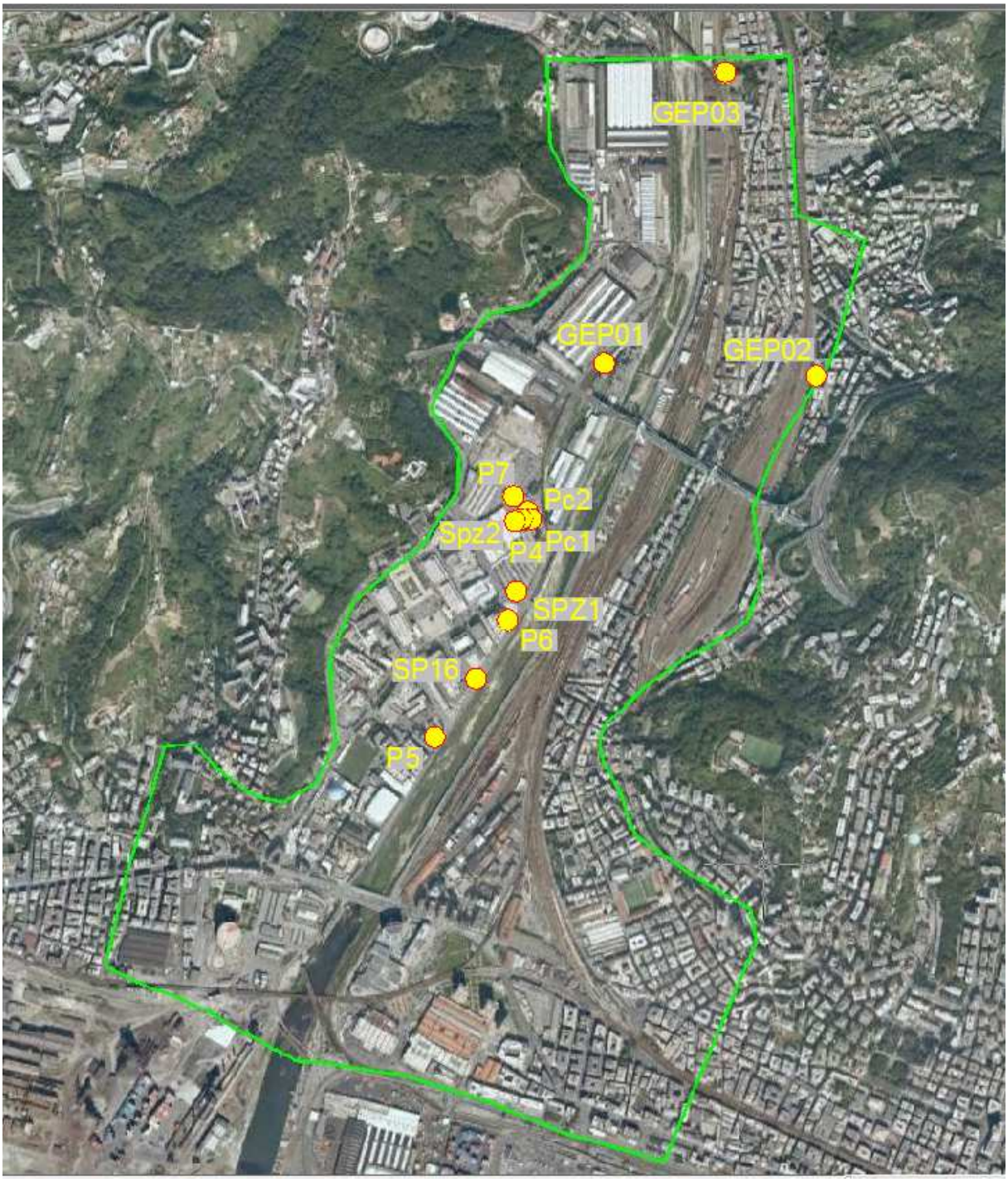


Figura 3-6 - Ubicazione dei punti utilizzati per la valutazione dello stato qualitativo delle acque di falda rapportata all'estensione dell'area di studio oggetto di modellazione numerica.

I punti GEP01, GEP02 e GEP03 corrispondono a pozzi ad uso idropotabile campionati regolarmente da Arpal (di cui almeno GEP01 risulta, secondo quanto appreso durante il campionamento del gennaio 2014, ormai inattivo). Il valor medio di conducibilità elettrica per questi punti risulta essere pari a circa 405 µS/cm (con una deviazione standard pari a circa 37 µS/cm).

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

Con riferimento alla campagna realizzata a giugno 2014 sui punti P5, P6, Sp16 e Pc1, le misure sono state effettuate dagli scriventi mediante una sonda multiparametrica Hydrolab modello Quanta. Il valor medio della conducibilità elettrica rilevato è pari a circa 432 µS/cm (con una deviazione standard pari a circa 10 µS/cm).

Per la campagna realizzata sempre in giugno 2014 (campionamento effettuato dal laboratorio Eurochem, Cfr. Allegato 13) sui punti Pc1, Pc2, SPz1 ed Spz2 è stato rilevato un valore medio di conducibilità elettrica pari a circa 370 µS/cm (con una deviazione standard pari a circa 12 µS/cm).

Chiaramente i dati forniti da Ilva sono relativi a punti di presa della rete e relativi ad acque da considerarsi miste, cioè provenienti da tutti i pozzi connessi al punto di presa (i pozzi esistenti P4 e P7 nel caso in oggetto). Seppur non puntuali ed influenzati dalle caratteristiche della rete di adduzione, tali dati sono decisamente in linea con i valori medi di conducibilità registrati per gli altri punti, difatti la media per queste misure è pari a circa 471 µS/cm.

La media di tutti i valori più recenti rilevati (esclusi quelli delle misure dalla rete Ilva) è pari a circa 402 µS/cm.

Come riportato in Tabella 3-4, a tali valori di conducibilità elettrica corrispondono delle concentrazioni di TDS variabili tra 240 e 305 mg/l ca.

Tali valori non sono correlabili ad una situazione di contaminazione della falda da parte dell'acqua di mare e ciò almeno fino alla posizione dei punti più a valle per i quale si dispone di dati, in particolare P6 e P5.

Tale osservazione acquista un notevole significato se si considera che le misure sono state effettuate durante la normale attività di emungimento dei pozzi del campo Ilva (difatti il campionamento in P6 è stato condotto a pozzo attivo) in un periodo dell'anno caratterizzato (cfr. Par. 3.4) da scarsi afflussi al corpo acquifero: nessun indizio di compromissione della qualità delle acque di falda è stato rilevato.

A riprova di ciò, la concentrazione di cloruri (valore rilevato in SPZ1 in giugno 2014 pari a 18 mg/l) risulta sempre di ordini di grandezza inferiore al valore caratteristico delle acque marine pari a 20 g/l.

Da ciò emerge, per un intorno dell'area per la quale si hanno dati a disposizione, una situazione lontana da condizioni di attenzione per il problema dell'intrusione del cuneo salino.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

3.6 Caratteristiche chimiche dell'acqua di mare

Per i dati chimici relativi all'acqua di mare si è fatto riferimento al monitoraggio in atto presso le Stazioni di Controllo Ecosistema Marino - DAM della rete di monitoraggio dell'ecosistema marino (cfr Doc. [9]) ed in particolare si è fatto riferimento ai dati di verticale della stazione MA00971.

Dal punto di vista chimico l'acqua di mare antistante la foce del Polcevera è caratterizzata da una salinità di circa 38psu (dove 1 psu coincide con 1 g di sale disciolto in 1l di acqua). Valore approssimabile a 38000 mg/l di TDS.

3.7 Caratteristiche geologiche, stratigrafiche ed idrogeologiche dell'area oggetto di modellazione

Dal punto di vista idrogeologico e stratigrafico l'area di interesse corrisponde al "macrocanale" costituito dalle alluvioni del torrente Polcevera.

Dal punto di vista idrogeologico esso è costituito, in sostanza, da un unico corpo acquifero. Per l'analisi di tale aspetto ci si riferisca a quanto riportato nella relazione generale di VIA.

A supporto di tale assunzione si richiamano gli esiti delle prove di pompaggio eseguite in corrispondenza del nuovo pozzo P4bis (cfr. Allegato 10 alla relazione generale di VIA), gli esiti delle analisi chimiche eseguite in giugno 2014 nell'area del campo pozzi Ilva (cfr. Allegato 13 alla relazione generale di VIA), le ricostruzioni idrostratigrafiche di cui alle Tavole 2 a-b-c-d della relazione generale di VIA.

Il corpo acquifero che ospita la falda libera del subalveo del torrente, da questo alimentata nel periodo di grassa, è costituito da alluvioni grossolane (sabbie a ghiaie).

All'interno del corpo acquifero principale si rinvengono, in diversi punti dell'area di studio, livelli di materiali fini (da sabbie limose ad argille, con spessori anche metrici) che, solo localmente, possono individuare due porzioni nell'acquifero, una sommitale ed una di base. Tali porzioni dove esistenti, sono comunque in collegamento idraulico e caratterizzate dal medesimo chimismo, come desumibile dalle analisi chimiche e dalla prova di pompaggio eseguiti.

In particolare si rileva la presenza di uno di tali livelli, in corrispondenza dei pozzi P4bis, P1bis e P6 del campo pozzi Ilva. Tale livello presenta spessore variabile da 6/7m fino a 10m e, localmente, inclusioni di materiali più grossolani.
In corrispondenza dei pozzi P5 e P7 tali livelli non risultano presenti.
È da segnalare un altro elemento notevole dal punto di vista idrogeologico, e cioè la formazione argillosa ubicata nel settore orientale dell'area di foce, in sinistra idrografica, poggiante direttamente sulle formazioni rocciose che sostengono le alluvioni ed arealmente esteso dagli affioramenti delle argilliti fino ad oltre la linea di costa naturale. La presenza di tale formazione è in grado di influenzare fortemente il grado di ingressione dell'acqua salmastra nell'interno della costa.
Si faccia riferimento alle Tavole 2 a-b-c-d per le ricostruzioni sopra descritte.
I sedimenti ghiaiosi dell'acquifero ed i maggiori livelli a bassa permeabilità individuati sono stati implementati nel modello numerico (cfr. Cap. 4 seguente).

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

4. ANALISI DEL REGIME DI FLUSSO E DEL TRASPORTO CON DENSITA' DEL FLUIDO VARIABILE

4.1 Generalità

Il presente capitolo si propone di introdurre i problemi legati alla modellazione del regime di flusso delle acque sotterranee aventi densità variabile in funzione della concentrazione salina. Nelle zone costiere, infatti, l'acqua di falda ha una concentrazione di sali disciolti che tende ad aumentare man mano che ci si avvicina al mare. La densità dell'acqua aumenta al crescere della concentrazione dei sali disciolti: l'acqua marina ha, pertanto, una densità maggiore rispetto all'acqua dolce. La risoluzione del problema del flusso richiede la conoscenza della densità dell'acqua e, quindi, la risoluzione simultanea dell'equazione di trasporto del sale, per valutare le variazioni di concentrazione salina da cui dipendono le variazioni di densità dell'acqua.

4.2 Aspetti teorici di base

L'analisi del regime di flusso nelle aree interessate dalla possibile penetrazione del cuneo salino richiede la risoluzione simultanea delle equazioni che governano il flusso nell'acquifero e il trasporto di soluto. Per simulare il regime di flusso nelle aree costiere occorre tenere conto delle variazioni di densità dell'acqua dovute alle diverse concentrazioni saline. L'acqua del mare è caratterizzata da una concentrazione salina molto più elevata dell'acqua piovana, che costituisce la principale sorgente di ricarica dell'acquifero. La densità dell'acqua è funzione della concentrazione dei sali disciolti (cfr, Docc. [13], [14] e [15]). La differente densità dell'acqua dolce dell'acquifero e dell'acqua del mare, dovuta alla differente concentrazione salina, ha una notevole influenza sul regime di flusso sotterraneo. Pertanto, l'equazione di bilancio della massa dell'acqua che fluisce nel sottosuolo deve tenere conto della variabilità della densità. Una forma generale del bilancio di massa dell'acqua nell'acquifero per situazioni in cui la densità non è costante è data da:

$$-\nabla \cdot (\rho \vec{q}) + \rho_b q_b = \rho S_{SP} \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \qquad (4.1)$$

dove:

ρ = densità del fluido [M/L^3];

$\vec{q}$ = velocità di flusso [L/T];

ρ_b = densità del fluido per sorgente/pozzo [M/L^3]

q_b = termine di sorgente/pozzo [T^{-1}];

S_{SP} = è il coefficiente di immagazzinamento specifico in termini di pressione [L·T^2/M];

P = pressione [M·L^{-1}·T^{-2}];

t = tempo [T];

n = porosità [-];

C = concentrazione dei sali disciolti che influenza la densità dell'acqua [M/L^3].

L'equazione (4.1) è valida nei casi in cui le variazioni di densità del fluido siano causate dalla concentrazione di soluto, ma non tiene conto dei possibili effetti indotti sulla densità dalla temperatura.

La dipendenza della densità dalla concentrazione del soluto è generalmente espressa mediante una relazione lineare (cfr. Docc. [16] e [17]):

$$\rho = \rho_f \left(1 + \overline{\alpha} \frac{C}{C_s} \right) \qquad (4.2)$$

dove:

ρ_f = densità dell'acqua dolce (ovvero in corrispondenza di un valore di concentrazione del soluto uguale a quello dell'acqua dolce) [M/L^3];

$\overline{\alpha} = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$ = rapporto di densità [-];

ρ_s = massimo valore della densità del fluido (ovvero in corrispondenza di un valore di concentrazione del soluto uguale a quello dell'acqua di mare) [M/L^3];

C_s = massimo valore di concentrazione del soluto, corrispondente alla concentrazione caratteristica dell'acqua di mare [M/L^3].

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

La risoluzione dell'equazione (4.1) richiede la simultanea risoluzione dell'equazione di trasporto del sale. Per soluti che non subiscono trasformazioni di natura chimica (come i sali disciolti nell'acqua di mare), l'equazione di trasporto è data da:

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t} = \nabla \cdot (nD_h \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{q}C) + q_b C_b \qquad (4.3)$$

dove:

D_h = coefficiente di dispersione idrodinamica [L^2/T]. Il coefficiente D_h tiene conto sia dei fenomeni di dispersione meccanica sia della diffusione molecolare (cfr. Doc. [18]) e può essere scomposto nella seguente forma: $D_h = D^* + D$, dove D^* è il coefficiente di diffusione effettivo e D è il coefficiente di dispersione meccanica. Il coefficiente di diffusione effettivo può essere correlato al coefficiente di diffusione in soluzione libera, D_0, mediante la seguente relazione: $D^* = \tau \cdot D_0$, dove τ è il fattore di tortuosità, che tiene conto della tortuosità dei percorsi compiuti dalle molecole di soluto all'interno del terreno a causa della presenza dei grani. Il fattore di tortuosità è un parametro adimensionale che assume valori inferiori all'unità (cfr. Doc. [18]). Il coefficiente di dispersione meccanica è generalmente correlato alla velocità effettiva di filtrazione, $\vec{v} = \frac{\vec{q}}{n}$, dalla seguente relazione lineare: $D = \alpha \cdot \vec{v}$, dove α è la dispersività del mezzo [L];

q_b = flusso volumetrico di una sorgente o di un pozzo per unità di volume dell'acquifero [T^{-1}];

C_b = concentrazione di una sorgente o di un pozzo [M/L^3].

L'equazione del flusso (4.1) e l'equazione di trasporto (4.3) sono accoppiate attraverso il termine di velocità di flusso $\vec{q}$ e la concentrazione di soluti C. La risoluzione del problema richiede, pertanto, l'integrazione simultanea delle due equazioni per via numerica (cfr. Docc. [16] e [17]).

Per risolvere le equazioni (4.1) e (4.3) occorre esplicitare la relazione tra la velocità di flusso e la pressione o il carico idraulico, espressa dalla Legge di Darcy (cfr. Doc. [18]):

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

$$\vec{q} = -\frac{K}{\mu}\left(\nabla P - \vec{e}\right) \tag{4.4}$$

dove:

K = coefficiente di permeabilità intrinseca [L^2];

μ = coefficiente di viscosità del fluido [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$];

$\vec{e}$ = vettore unitario nella direzione della gravità (diretto verso il basso) [-].

Nel piano orizzontale (direzioni x ed y), la velocità di flusso è data da:

$$q_x = -\frac{K_x}{\mu}\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \tag{4.5a}$$

$$q_y = -\frac{K_y}{\mu}\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right) \tag{4.5b}$$

dove:

q_x = velocità di flusso nella direzione x;

q_Y = velocità di flusso nella direzione y;

K_x = coefficiente di permeabilità intrinseca nella direzione x;

K_Y = coefficiente di permeabilità intrinseca nella direzione y.

La velocità di flusso nel piano verticale (direzione z) è, invece, dato da:

$$q_z = -\frac{K_z}{\mu}\left(\frac{\partial P}{\partial z} - 1\right) \tag{4.6}$$

dove:

K_z = coefficiente di permeabilità intrinseca nella direzione z.

Nei problemi classici relativi agli acquiferi la densità dell'acqua è generalmente assunta costante ed il carico idraulico è normalmente utilizzato come variabile in quanto facilmente misurabile. Il carico idraulico rappresenta l'elevazione alla quale risale l'acqua all'interno di un piezometro. Matematicamente, il carico idraulico, h, è espresso dalla seguente relazione:

$$h = z + \frac{P}{\rho g} \tag{4.7}$$

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

dove:

z = quota del punto [L];

g = accelerazione di gravità [L/T^2]

Per i problemi in cui la densità dipende dalla concentrazione dei sali disciolti il carico idraulico non rappresenta una scelta opportuna di variabile matematica, in quanto risulta essere dipendente dalla concentrazione del sale attraverso la densità del fluido. Per questo motivo, Lusczynski (1961,cfr. Doc. [19]) ha suggerito per primo di utilizzare come variabile il carico idraulico equivalente di acqua dolce, h_f, definito dalla seguente relazione:

$$h_f = z + \frac{P}{\rho_f g} \tag{4.8}$$

Ricavando la pressione P dall'equazione (4.7) e sostituendo nell'equazione (4.8) si ricava la relazione tra il carico idraulico, h, ed il carico idraulico equivalente di acqua dolce, h_f:

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} z\,. \tag{4.9}$$

Sostituendo la variabile h con il carico idraulico equivalente di acqua dolce, h_f, nelle equazioni (4.5 a,b) e (4.6), si ottengono le seguenti forme della Legge di Darcy:

$$q_x = -\frac{K_x \rho_f g}{\mu}\left(\frac{\partial h_f}{\partial x}\right); \tag{4.10a}$$

$$q_y = -\frac{K_y \rho_f g}{\mu}\left(\frac{\partial h_f}{\partial y}\right); \tag{4.10b}$$

$$q_z = -\frac{K_z \rho_f g}{\mu}\left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f}\right). \tag{4.11}$$

Sostituendo i coefficienti di permeabilità intrinseca con il coefficiente di conducibilità idraulica, k, pari a

$$k = \frac{K\rho_f g}{\mu} \tag{4.12}$$

si ottengono le seguenti forme della Legge di Darcy:

$$q_x = -k_x\left(\frac{\partial h_f}{\partial x}\right); \tag{4.13a}$$

$$q_y = -k_y\left(\frac{\partial h_f}{\partial y}\right); \tag{4.13b}$$

$$q_z = -k_z\left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f}\right). \tag{4.14}$$

dove:

k_x = coefficiente di conducibilità idraulica nella direzione x [L/T];

k_y = coefficiente di conducibilità idraulica nella direzione y [L/T];

k_z = coefficiente di conducibilità idraulica nella direzione z [L/T].

Il coefficiente k rappresenta la conducibilità idraulica del terreno saturato con acqua dolce.

Il termine di immagazzinamento, S_{SP}, che compare nell'equazione (4.1) può essere riscritto in termini di un coefficiente di immagazzinamento equivalente, S_{Sf}, definito nel seguente modo:

$$S_{Sf} = S_{SP}\rho_f g. \tag{4.15}$$

Utilizzando le equazioni (4.13a,b), (4.14) e (4.15), il bilancio di massa del fluido nell'acquifero può essere riscritto nella seguente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\rho k_x\left(\frac{\partial h_f}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\rho k_y\left(\frac{\partial h_f}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\rho k_z\left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f}\right)\right] = \rho S_{Sf}\frac{\partial h_f}{\partial t} + n\frac{\partial \rho}{\partial C}\frac{\partial C}{\partial t} - \rho_s q_s. \tag{4.16}$$

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

E' bene evidenziare che nella derivazione del bilancio di massa (4.16) si è assunto che la viscosità dell'acqua di falda non sia influenzata dalla concentrazione dei sali disciolti.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

5. STRUTTURA E CARATTERISTICHE DEL MODELLO NUMERICO TRIDIMENSIONALE

5.1 Descrizione del codice di calcolo

Il modello numerico è stato implementato attraverso il programma FEFLOW® (Finite-Element Symulation System for Subsurface Flow and transport Processes) versione 6.2 aggiornata al luglio 2014. Si tratta di un codice di calcolo agli elementi finiti prodotto da WASY, Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd di Berlino, utilizzabile per la soluzione di problemi complessi di filtrazione, di trasporto di agenti inquinanti e di trasporto del calore.

Il programma permette la modellazione bi e tri-dimensionale del dominio da studiare, l'analisi in regime stazionario e transitorio, la simulazione di acquiferi confinati e non confinati, l'analisi in mezzi porosi saturi e insaturi, la riproduzione di fenomeni di diffusione e dispersione degli agenti inquinanti in falda, tenendo conto degli effetti dovuti sia ai processi chimici (adsorbimento, decadimento, biodegradazione) sia ai processi governati dalla densità dei fluidi (es. cuneo salino). Come principali risultati della simulazione, FEFLOW® fornisce i valori del carico idraulico, le linee di flusso e le concentrazioni delle specie chimiche implementate in tutti i punti del dominio spaziale considerato e a differenti istanti di tempo. E' possibile ricostruire il percorso delle particelle di flusso (particle tracking backward) o riprodurne la propagazione (particle tracking foreward), individuando anche la posizione occupata a istanti prefissati. Sono disponibili differenti metodi geostatistici per l'interpolazione dei dati idrogeologici, siano essi puntuali o distribuiti in aree delimitate. L'interpolazione spaziale può essere accoppiata anche al problema temporale, vale a dire che i dati possono variare non solo da punto a punto ma anche nel tempo.

Di particolare importanza per il problema studiato è la possibilità di analizzare problemi con densità del fluido variabile e geometrie bi e tridimensionali particolarmente complesse.

FEFLOW® adotta come variabili la concentrazione dei sali disciolti, C, e il carico idraulico equivalente di acqua dolce, h_f, e risolve simultaneamente i bilanci di massa espressi dalle equazioni (4.3) e (4.16). Il parametro richiesto in ingresso per l'analisi di

problemi con densità del fluido variabile è il rapporto di densità $\overline{\alpha}$, che può essere valutato sulla base della salinità misurata dell'acqua del mare. Particolare attenzione deve essere riposta nell'assegnazione delle condizioni iniziali e al contorno in termini di carico idraulico che devono essere preventivamente espresse in termini di carico idraulico equivalente di acqua dolce.

5.2 Caratteristiche geometriche del modello numerico

Come anticipato nel Par. 3.1, il dominio del modello numerico si estende, longitudinalmente, dalla linea naturale di costa (escludendo l'area costruita a mare per la quale si è assunto che il mezzo saturo contenga acqua di mare; tale scelta è stata operata anche per la modellazione realizzata da Arpal, cfr. Paragrafo successivo) verso monte per circa 3km, fino quasi al ponte ferroviario in corrispondenza di Piazzale Emilio Guerra circa 1200m a monte del pozzo P7 (quello del campo pozzi Ilva più a monte). Di fatto esso risulta ben centrato sul campo pozzi Ilva.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI



Figura 5-1 - Mesh del modello numerico con sovrapposizione cartografica

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

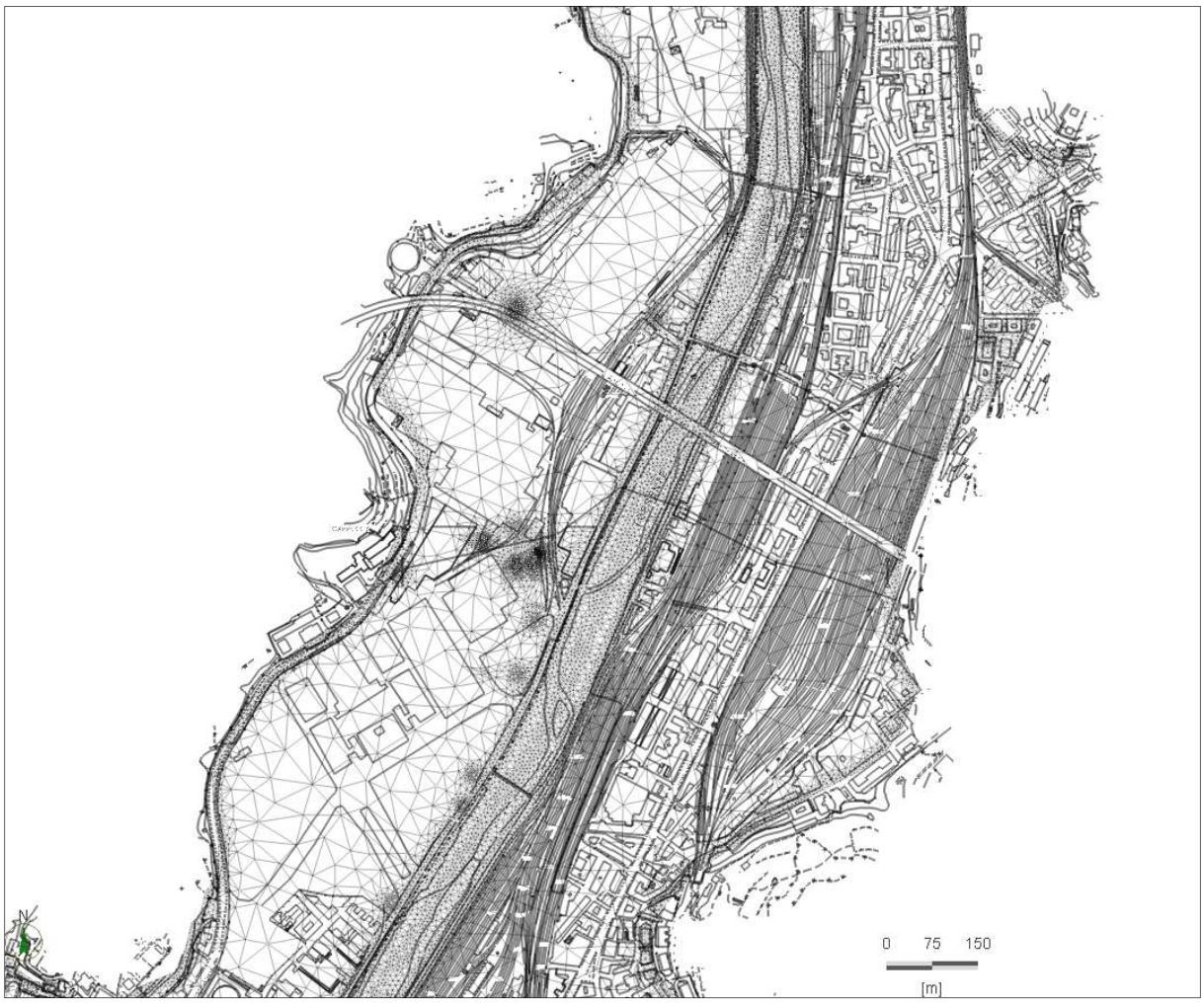


Figura 5-2 - Particolare della mesh del modello numerico nell'area del campo pozzi Ilva e relativa cartografia

L'estensione è stata definita prendendo in considerazione l'esigenza di avere dei limiti, dove assegnare le condizioni al contorno, sufficientemente lontani dall'area obiettivo della modellazione. Infatti, la lontananza permette ragionevolmente di ritenere trascurabili gli effetti delle semplificazioni necessariamente introdotte nell'attribuzione delle condizioni al contorno lungo i confini stessi.

Trasversalmente il modello include i limiti laterali del materasso alluvionale del Polcevera, arrestandosi alla linea di affioramento del substrato roccioso. Esso presenta un'ampiezza media di circa 850m (con un minimo in corrispondenza del confine nord pari a circa 650m ed un massimo in corrispondenza della linea di costa pari a circa 1500m).

Dal punto di vista stratigrafico il modello presenta una profondità variabile da pochi metri (in corrispondenza dei limiti laterali) ad un massimo di circa 55m in corrispondenza dell'incisione del Polcevera presso la foce.

Il modello è stato strutturato con una sovrapposizione di 10 layer di spessore variabile per un totale di oltre 308.000 elementi di calcolo.

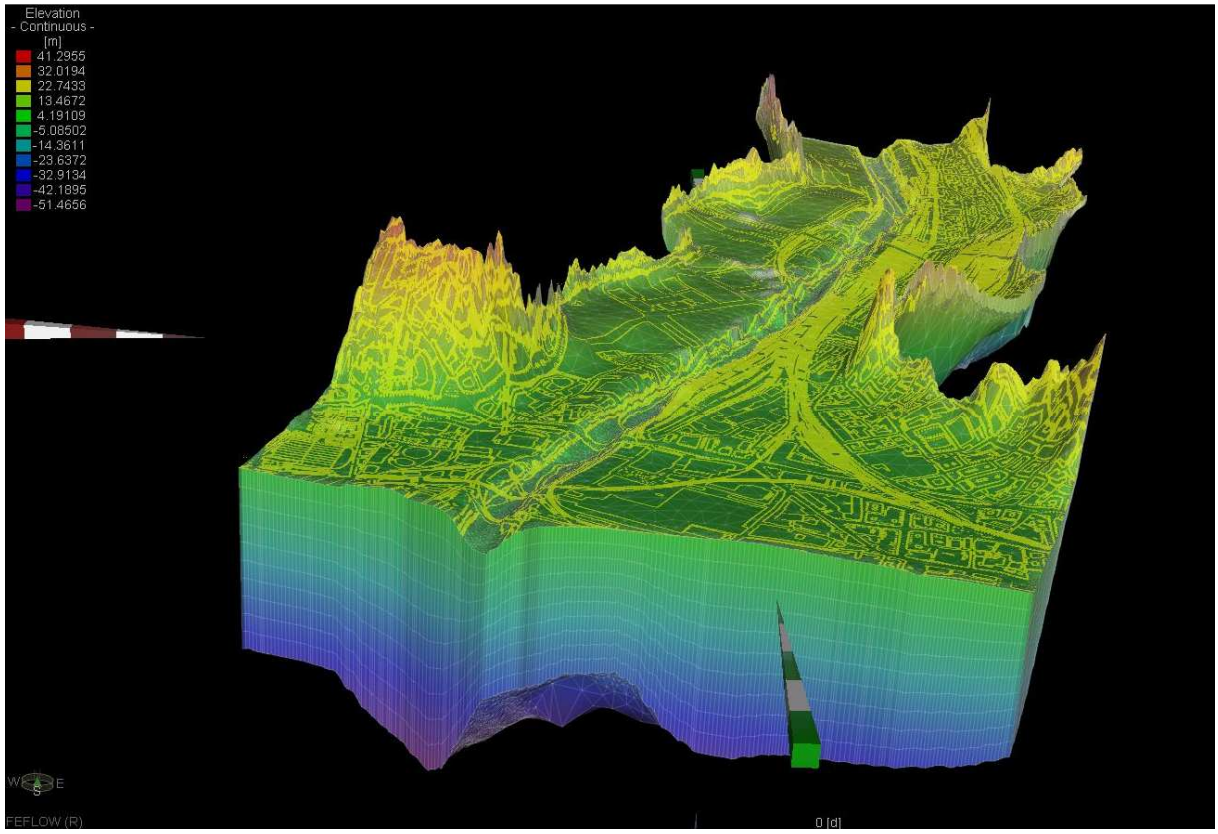


Figura 5-3 - Rappresentazione tridimensionale del modello numerico con evidenziazione dei dieci layer che lo costituiscono. Il modello è rappresentato con una fattore di esagerazione pari 10 per l'asse verticale.

5.3 Distribuzione dei parametri idrogeologici

I dati stratigrafici disponibili assieme a quelli contenuti nel database della Regione Liguria sono stati successivamente utilizzati per definire le stratificazioni di materiali alluvionali all'interno del dominio del modello.

In particolare, con i dati stratigrafici disponibili per l'area della foce del Polcevera (costituiti da stratigrafie in formato alfanumerico, cfr. Doc. [6]) sono state elaborate alcune sezioni stratigrafiche schematiche (cfr. Tavola 2 d) che hanno consentito di individuare una vasta area fronte mare caratterizzata da terreni con bassa

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

conducibilità idraulica fino alla superficie di passaggio dalle alluvioni alle rocce del bedrock.

Analogamente, le stratigrafie disponibili per la parte più a monte del dominio, hanno consentito di determinare la presenza e valutare l'estensione di alcune lenti di materiali limosi/argillosi, discontinue all'interno dell'acquifero, che sono state replicate (nei limiti consentiti dai dati disponibili e dalle interpolazioni effettuate) all'interno del modello numerico.

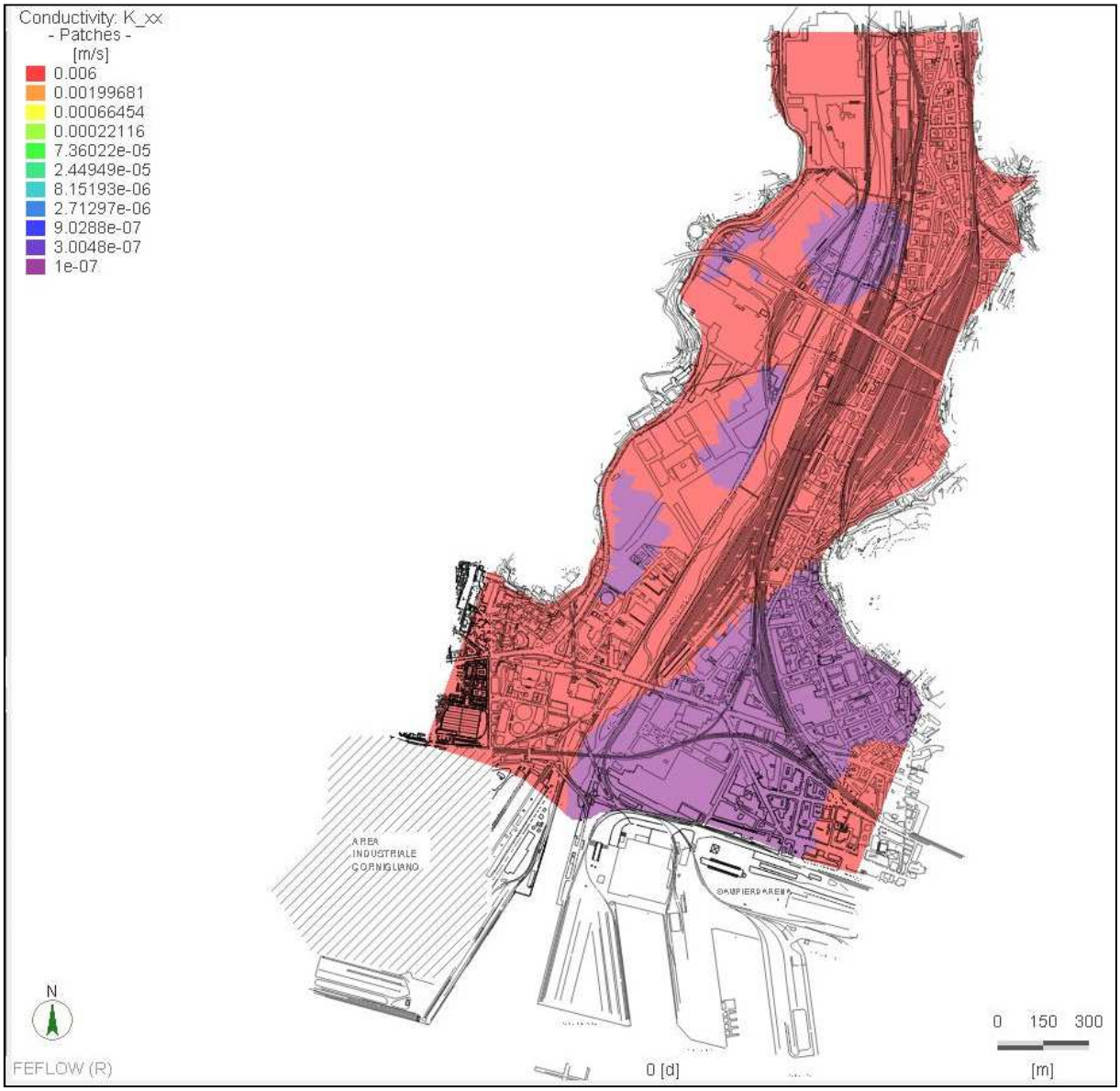


Figura 5-4- Rappresentazione (layer 5) delle alluvioni nel modello numerico tridimensionale. I diversi colori rappresentano i materiali a differente conducibilità idraulica (strati acquiferi in rosso e strati a bassa conducibilità in viola).

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

In particolare si noti come le sezioni stratigrafiche dell'area in cui ricadono i pozzi P7, e P4Bis presentino una lente di materiali fini (spessore variabile, di 7/10 m ca., con intercalazioni di materiali grossolani) che separa l'acquifero in due porzioni (superiore ed inferiore, comunicanti), tuttavia, come dimostrano le stratigrafie disponibili per i punti P5 ed SP16, la sua presenza non riguarda l'intero campo pozzi Ilva.

Le sezioni schematiche sono riportate in Tavola 2 d assieme alla planimetria di riferimento mentre per le stratigrafie si faccia riferimento all'Allegato 9 della relazione generale di VIA.

Di seguito sono riportate alcune immagini raffiguranti la struttura del modello numerico nella sua configurazione definitiva.

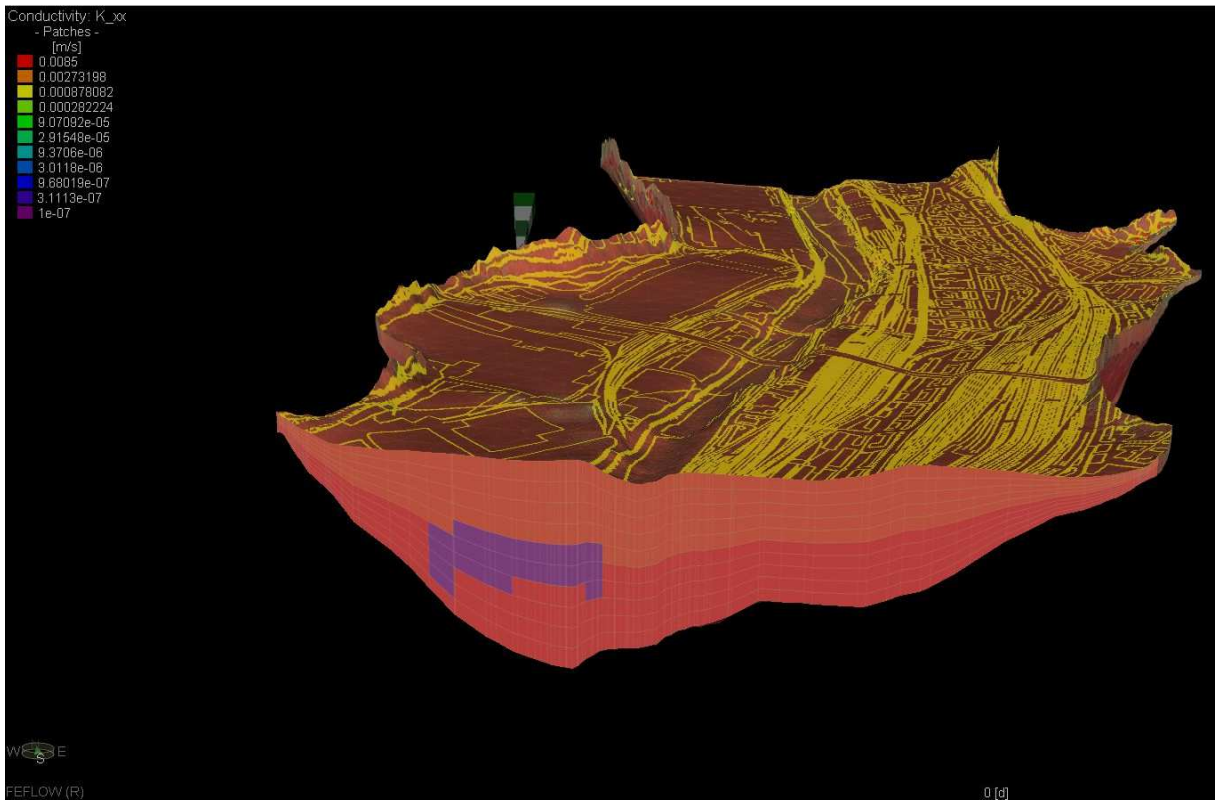


Figura 5-5 - Sezione trasversale del modello numerico tridimensionale in corrispondenza dello strato di materiali a bassa permeabilità in corrispondenza dei pozzi P4bis, P1bis, e P6 del campo pozzi Ilva (cfr. Sezioni stratigrafiche delle Tavole 2 a-b-c-d).

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

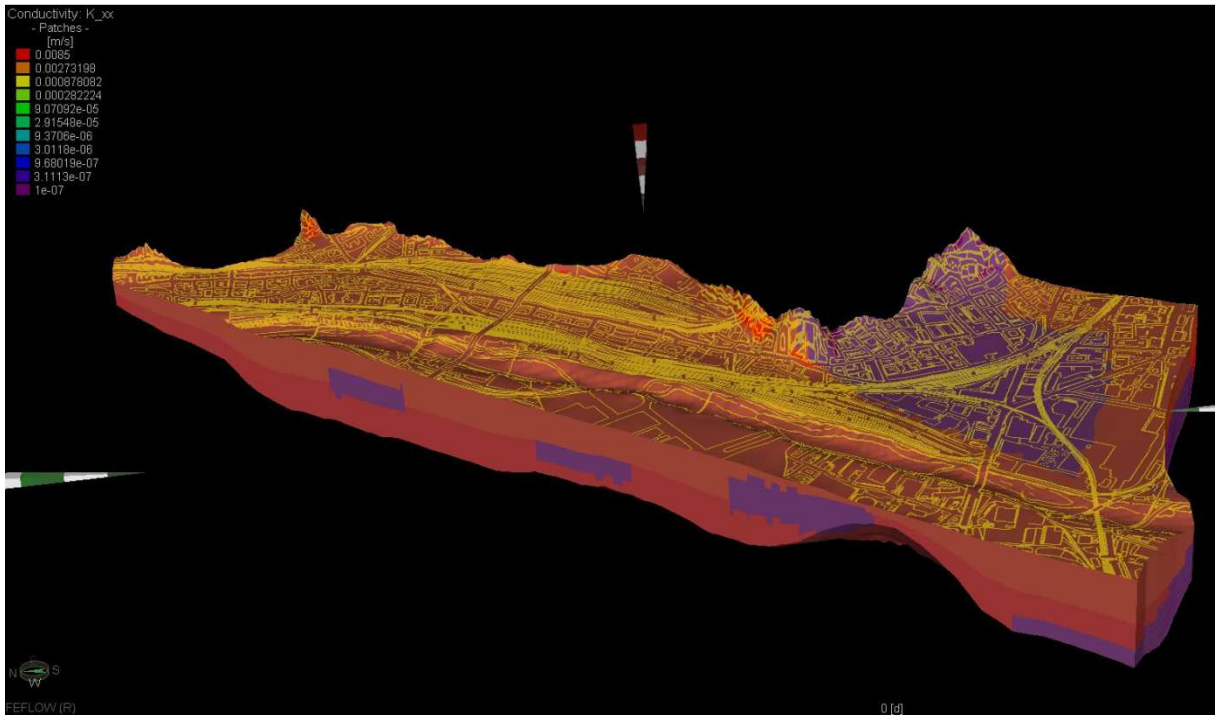


Figura 5-6 - Sezione longitudinale del modello numerico tridimensionale in destra idrografica del Polcevera. É possibile osservare alcuni degli strati di materiale a bassa conducibilità ricostruiti sulla base delle interpretazioni stratigrafiche effettuate (cfr. Sezioni stratigrafiche delle Tavole 2 a-b-c-d).

A seguito delle attività di calibrazione del modello numerico (metodologia trial&error per la determinazione dei parametri idrogeologici del modello numerico che meglio consentono di ricostruire una data piezometria, cfr. Capitolo 7) si è pervenuti ad una distribuzione di conducibilità idrauliche in cui sono stati assegnati valori di k variabili da $8{,}5*10^{-3}$ m/s a $6*10^{-3}$ m/s per i materiali costituenti l'acquifero e un valore di 10^{-7} m/s per i materiali limoso-argillosi che costituiscono le lenti o le formazioni a bassa permeabilità.

Nell'attribuzione delle conducibilità idrauliche si è cercato di tenere conto dell'anisotropia verticale, che caratterizza i depositi naturali, riducendo di circa un fattore 10 la conducibilità idraulica verticale. Ciò è stato fatto sia per le formazioni limoso argillose a bassa permeabilità che per le alluvioni rappresentate nei primi 5 layer. Sui restanti layer la migliore calibrazione del modello è stata ottenuta assumendo uguali le conducibilità idrauliche orizzontale e verticale.

Per quanto riguarda il coefficiente di immagazzinamento, la calibrazione del modello ha fornito i risultati migliori adottando un valore pari a 0,5 per i materiali grossolani (sabbie e ghiaie) ed un valore pari a 0,1 (desunto da bibliografia, cfr. Doc. [1]) per i materiali delle formazioni limoso argillose.

Confrontando i valori dei parametri idrogeologici adottati nel modello numerico con quelli emersi dalla prova di portata e dallo studio bibliografico eseguito per l'area di studio (cfr. Capitolo 6 della relazione generale di VIA e relativo Allegato 10) è possibile osservare che sono stati adottati valori tra loro prossimi e confrontabili.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

6. CONDIZIONI AL CONTORNO PER IL FLUSSO

6.1 Limiti a potenziale imposto

In corrispondenza dei limiti ed all'interno del dominio del modello numerico sono state applicate condizioni al contorno di potenziale imposto (condizioni di Dirichlet o del I tipo). Si tratta del carico assegnato al confine di monte, quello assegnato al confine di valle (caratterizzato da una configurazione particolare che ha consentito di prendere in considerazione la differente densità dell'acqua di mare, ed in corrispondenza del corso del torrente Polcevera.

6.2 Condizioni al contorno di monte idrogeologico

Lungo il confine nord è stato arbitrariamente assegnato, in mancanza di una misura disponibile, una quota del livello piezometrico di circa 11,35 m s.l.m. Tale valore è compatibile con la quota del piano campagna in corrispondenza del limite di monte del modello e con la quota del letto del corso d'acqua.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

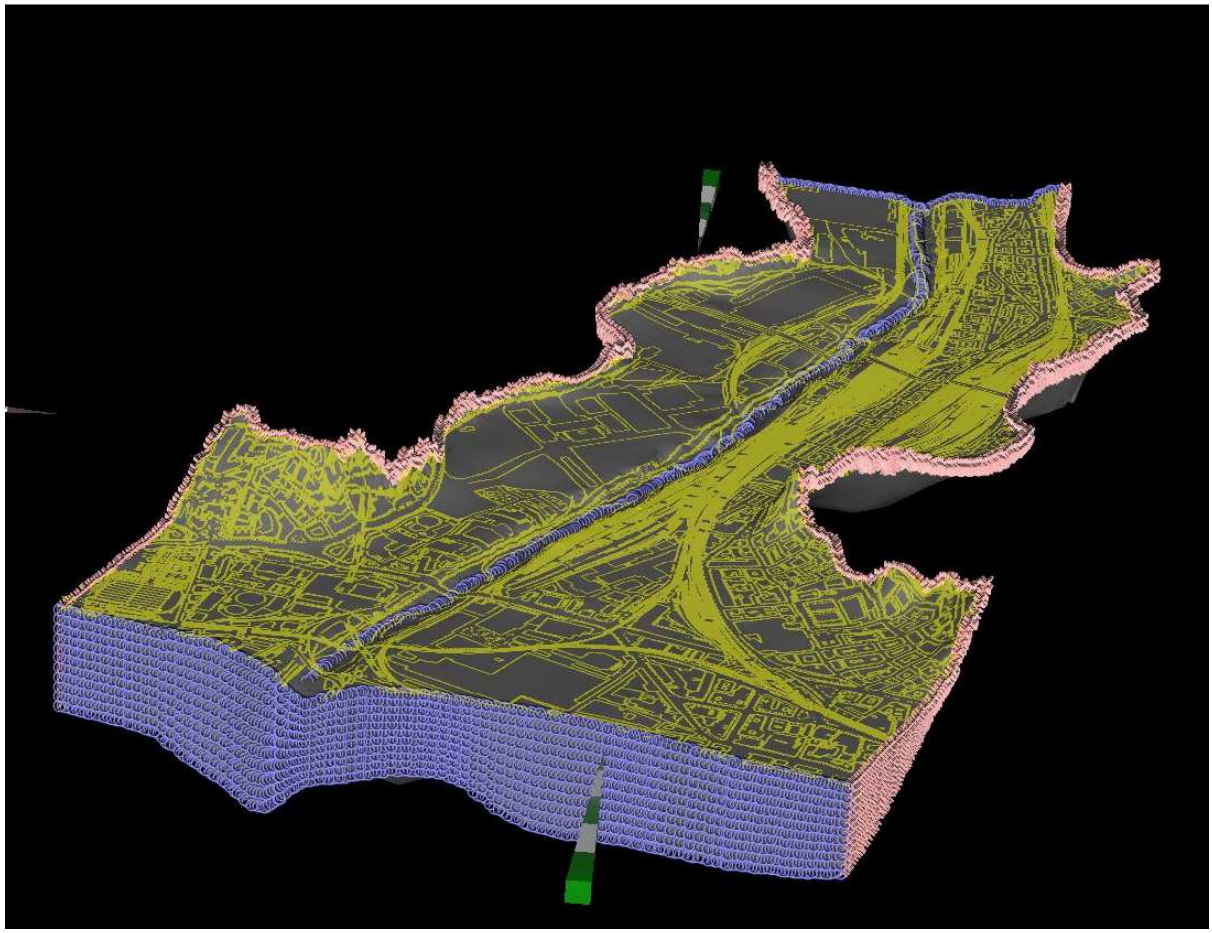


Figura 6-1- Distribuzione delle condizioni al contorno assegnate sul modello. In blu sono evidenziate le condizioni al contorno di carico assegnato (monte, valle e corso del torrente) mentre in rosa sono evidenziate le condizioni di flusso assegnato sui limiti laterali del modello.

6.3 Condizioni al contorno in corrispondenza del torrente Polcevera

Per quanto riguarda il torrente Polcevera, esso è stato rappresentato (similmente a quanto fatto nella modellazione Arpal) mediante un carico assegnato.

Tra le stazioni idrometriche disponibili lungo il torrente Polcevera l'unica ragionevolmente vicina all'area oggetto di modellazione è quella di Rivarolo, situata circa 300 m oltre il limite di monte del dominio del modello numerico. Tuttavia i dati di tale stazione sono risultati non validati e, pertanto, non sono stati rilasciati dall'ufficio Arpal competente.

La stazione successiva disponibile (Ponte Decimo) è risultata troppo lontana dai limiti del modello (6 km in linea d'aria) e relativa ad una sezione dalle caratteristiche ben differenti rispetto a quelle del tratto terminale del Polcevera, oggetto della modellazione numerica.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

Nel modello numerico si è deciso di assegnare, lungo il tracciato del Polcevera, un battente di 10 cm rispetto alla quota di fondo.

Tale condizione rispecchia lo stato del tratto terminale del Polcevera che presenta nell'alveo ampie zone asciutte ed alcune zone in cui il battente è mediamente di 10-15 cm (salvo particolari situazioni dovute ad eventi piovosi o di piena, limitati nel tempo e non considerate in questa sede in quanto non attinenti con le finalità della modellazione).

Per le simulazioni in stato transitorio, con la finalità di rappresentare la condizione di magra estiva, si è deciso cautelativamente di rappresentare il periodo di magra della falda e del Polcevera (assunto pari a quattro mesi, cfr. Par. 3.4).

In particolare si è cercato di replicare l'osservazione del fatto che durante il periodo di magra il battente nel Polcevera è quasi inesistente (si possono, infatti, osservare dei tratti di alveo in cui è possibile osservare un minimo battente) o totalmente inesistente, facendo venire meno l'alimentazione alla falda.

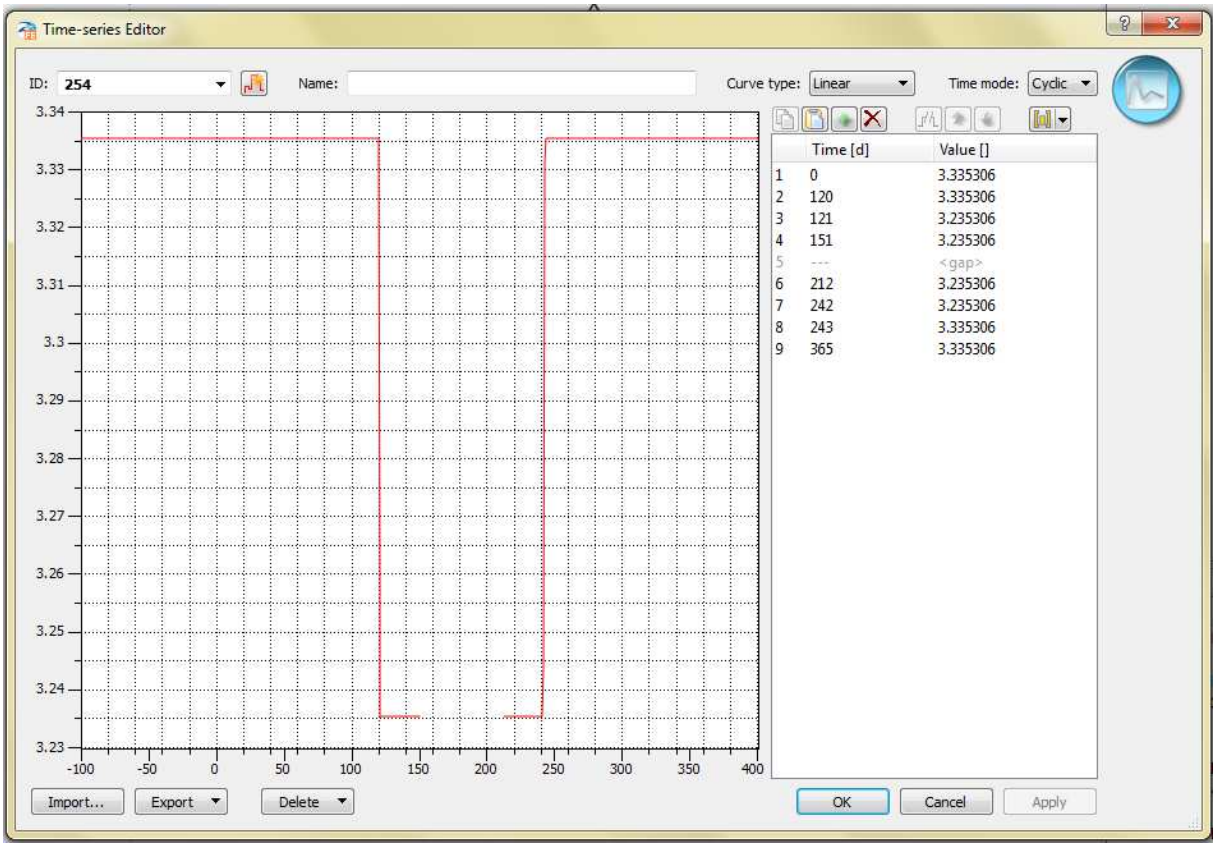


Figura 6-2-Esempio di serie temporale utilizzata per rappresentare il periodo di magra del sistema falda torrente.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

Per rappresentare il suddetto periodo di quattro mesi si è, pertanto, proceduto nel seguente modo:

- riduzione a zero del battente di 10 cm (adottato per il restante periodo dell'anno) nel primo mese;
- annullamento completo della condizione al contorno di carico assegnato per i successivi due mesi (in tal caso l'alimentazione è possibile solo da monte);
- ripristino di un battente pari a zero per un ulteriore mese.

Al termine del quarto mese di magra si è ripristinato il battente di 10 cm sulla quota di alveo per tutto il resto dell'anno-tipo simulato. Tali accorgimenti (eliminazione del carico assegnato) risultano essere in linea con quanto implementato nel modello numerico Arpal.

Ciò ha consentito di valutare l'azione di un emungimento continuo in condizioni di assenza di alimentazione da parte del torrente Polcevera.

6.4 Condizioni al contorno in corrispondenza della linea di costa

In corrispondenza delle linee di costa si è adottata una condizione di carico idraulico equivalente di acqua dolce fissato (cfr. Par. 4.2). Il carico idraulico equivalente di acqua dolce è stato determinato mediante l'equazione (4.9):

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} z \,.$$

dove:

- $\rho = \rho_s = 1027$ kg/m^3 = densità dell'acqua di mare;
- $\rho_f = 1000$ kg/m^3 = densità dell'acqua dolce;
- h = 0 m = altezza di carico reale;
- z = profondità (z = 0 in corrispondenza del tetto dell'acquifero e z negativa andando in profondità).
- La densità dell'acqua di mare è stata valutata per una concentrazione salina pari a 38000 mg/l (cfr. Par. 3.6).

In corrispondenza della costa, l'equazione di sopra può essere riscritta nella seguente forma:

$$h_f = -\overline{\alpha} z \,.$$

dove $\overline{\alpha} = 0.027$ è il valore del rapporto di densità nell'ipotesi di un contenuto salino di circa 38g/l per l'acqua di mare.
Il carico idraulico equivalente di acqua dolce risulta, quindi, linearmente variabile con la profondità e, in corrispondenza della linea di costa del caso in esame, varia da 0 ad oltre un metro (0 m÷1.37 m) in funzione del layer considerato (e dunque in funzione dello spessore ricostruito dell'acquifero).

6.5 Altre condizioni al contorno

Lungo i confini laterali del dominio del modello ed in corrispondenza del piano che rappresenta il tetto del bed rock che sostiene l'acquifero oggetto di modellazione sono state imposte condizioni di flusso nullo (condizioni di Neumann o del II tipo).
Nell'area oggetto di modellazione risultano presenti anche 3 ulteriori pozzi (GEP 01, 02 e 03) dei quali, tuttavia , non si è tenuto conto per carenza di informazioni, per posizione o per inattività (è il caso del pozzo GEP03, attivo per altro solo pochi mesi all'anno, situato a ridosso del limite di monte del dominio del modello numerico e la cui rappresentazione non sarebbe stata significativa e del pozzo GEP01 del quale si è appreso, durante la campagna del 16 Gennaio 2014 alla presenza dei tecnici Arpal, che non risulta più utilizzato).
Sono state, invece, rappresentate due derivazioni (pozzi Erzelli) insistenti sull'area dei pozzi P7, P4bis e P1bis. Di tali derivazioni sono note la posizione e la portata totale emunta (pari a 50 l/s). Tale portata è stata equamente suddivisa tra i due punti nelle simulazioni in transitorio.
Coerentemente con quanto illustrato nel Paragrafo 3.4, sono stati trascurati gli apporti meteorici a causa della particolare condizione di totale copertura e sistemazione idraulica dell'area rappresentata nel modello.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

7. CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Una volta strutturato il modello numerico come indicato nei capitoli precedenti si è proceduto alla calibrazione dello stesso sia per quanto riguarda il parametro di conducibilità idraulica K (calibrazione del modello in stato stazionario) che per quanto riguarda il parametro di immagazzinamento specifico (Sy, specific yield).

La calibrazione è consistita, nel primo caso, nel tentativo di replicare, fissate le condizioni al contorno e quelle iniziali, i valori di quota piezometrica misurati in gennaio 2014.

Nel secondo caso si è cercato invece di replicare gli abbassamenti registrati ai punti di controllo durante la prova di portata eseguita sul nuovo pozzo P4bis nel settembre 2014 (cfr. Allegato 10 alla relazione generale di VIA).

In entrambi i casi si è proceduto per tentativi (procedura Trial&Error), a partire dai valori di riferimento bibliografici o dai dati disponibili.

Nel determinare la distribuzione del parametro di interesse, che consentisse la migliore calibrazione del modello numerico implementato, si è tenuto conto sia della calibrazione in stato stazionario che di quella in stato transitorio.

7.1 Criterio di calibrazione dei parametri di conducibilità idraulica

Con criterio di calibrazione si intende l'indicatore con cui esprimere la differenza tra "reale e simulato" e il valore soglia che tale parametro non deve superare per considerare il modello sufficientemente tarato.

Lo scostamento che le altezze piezometriche calcolate (soluzioni dell'equazione differenziale) hanno dai livelli piezometrici misurati in campo costituiscono "l'errore della simulazione", quando tale errore ricade entro una soglia di accettabilità il modello si ritiene calibrato. La soglia di accettabilità è definita prima delle simulazioni sulla base della qualità delle misure di campo a disposizione, delle semplificazioni effettuate, degli obiettivi del modello.

Il criterio di calibrazione applicato in tutte le simulazioni è la deviazione standard dei residui, RMS (radice della somma dei quadrati residui). Il parametro è basato sulla differenza tra l'altezza piezometrica misurata in campo e l'altezza calcolata dal modello:

$$RMS \equiv \left[\frac{1}{n} * \sum_{n}^{1} \left(Hm_i - Hc_i \right)^2 \right]^{.0.5}$$

dove n è il numero di punti in cui si attua il confronto tra altezze piezometriche misurate in campo, Hm, e calcolate dal modello, H_C.

Secondo Anderson e Woessner (cfr. Doc. [11]), se il rapporto tra la deviazione standard dei residui e l'intervallo dei livelli piezometrici misurati in campo è sufficientemente piccolo, gli errori nella simulazione sono solo una piccola parte dell'intera risposta del modello.

La deviazione standard dei residui costituisce per tutte le simulazioni il criterio di calibrazione, con cui si è attuata la procedura di calibrazione "trial and error": i parametri idrogeologici sono stati di volta in volta variati fino a ottenere la migliore simulazione, quella cioè che riproduce i carichi di campo con un margine di errore che soddisfa il criterio di calibrazione.

Oltre al parametro RMS è stato calcolato anche il valore di RMS_{norm} ossia il valore di RMS normalizzato sull'intervallo di variazione dei valori misurati in campo presi come riferimento.

Ossia:

$$RMS_{norm} = \frac{RMS}{[H_{m1}; H_{m2}; \dots]_{max} - [H_{m1}; H_{m2}; \dots]_{min}}$$

Tale parametro permette anch'esso di valutare la bontà della calibrazione ed in particolare si ritiene che valori al di sotto del 10%, come anche stabilito nelle linee guida del U.S. Geological Survey (cfr. Doc. [12]), possano ritenersi accettabili e caratteristici di una simulazione che ben riproduce la situazione reale misurata.

7.2 Calibrazione del modello in stato stazionario

Come anticipato, il riferimento per la taratura dei parametri di conducibilità idraulica è costituito dalle misure piezometriche rilevate nel gennaio 2014. In rapporto all'estensione del modello si è ritenuto che il numero di dati a disposizione (nove misure freatimetriche) consentisse di pervenire ad una calibrazione del modello numerico affetta da un errore indicativamente compreso tra il 10% ed il 15%.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

Con la usuale procedura per tentativi, si è ottenuto un errore normalizzato dei residui (RMS_{norm}) inferiore al 10%, secondo la Tabella 7-1 riportata in seguito.

Nella tabella Tabella 7-1 sono riportati i valori misurati in campo ed i rispettivi valori calcolati nei medesimi punti del modello numerico.

Il valore medio dei residui assoluti è di poco superiore ai 40 cm.

ID	Hm - Campagna 16 gennaio 2014	Hc - livelli piezometrici calcolati	Residuo	Val. Ass. Residui
GEP01	7,38	8,07	-0,69	0,690
SPZ1	5,16	5,35	-0,19	0,190
SPZ2	5,54	6,13	-0,59	0,590
P5	3,60	3,20	0,40	0,402
P6	4,77	4,93	-0,16	0,160
P7	5,69	6,40	-0,71	0,710
SP13	6,75	7,36	-0,61	0,610
SP15	8,58	8,20	0,38	0,381
SP16	4,01	4,02	-0,01	0,010
		4,98	**I**	Intervallo dei valori piezometrici misurati in campo
		0,4795	**RMS**	Deviazione standard residui
		-0,24	**Δ medio**	Media residui
		9,63%	**RMS/I**	Valutazione taratura modello
		0,969	**C**	Coeff di correlazione
		0,416	**AbsErrMean**	Media valori assoluti residui

Tabella 7-1- Calibratura del modello numerico. In tabella sono riportati le altezze piezometriche rilevate in campo e quelle calcolate dal modello numerico nelle medesime posizioni dei punti di controllo fisici. L'errore normalizzato, per la distribuzione di conducibilità idrauliche assegnata, è risultato inferiore al 10%.

Nella Figura 7-1 si riporta la retta di taratura del modello (generate in automatico da software Feflow). Come è possibile osservare vi è un buon accordo tra i valori misurati e quelli calcolati (che giacciono a cavallo della bisettrice del I° quadrante)

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

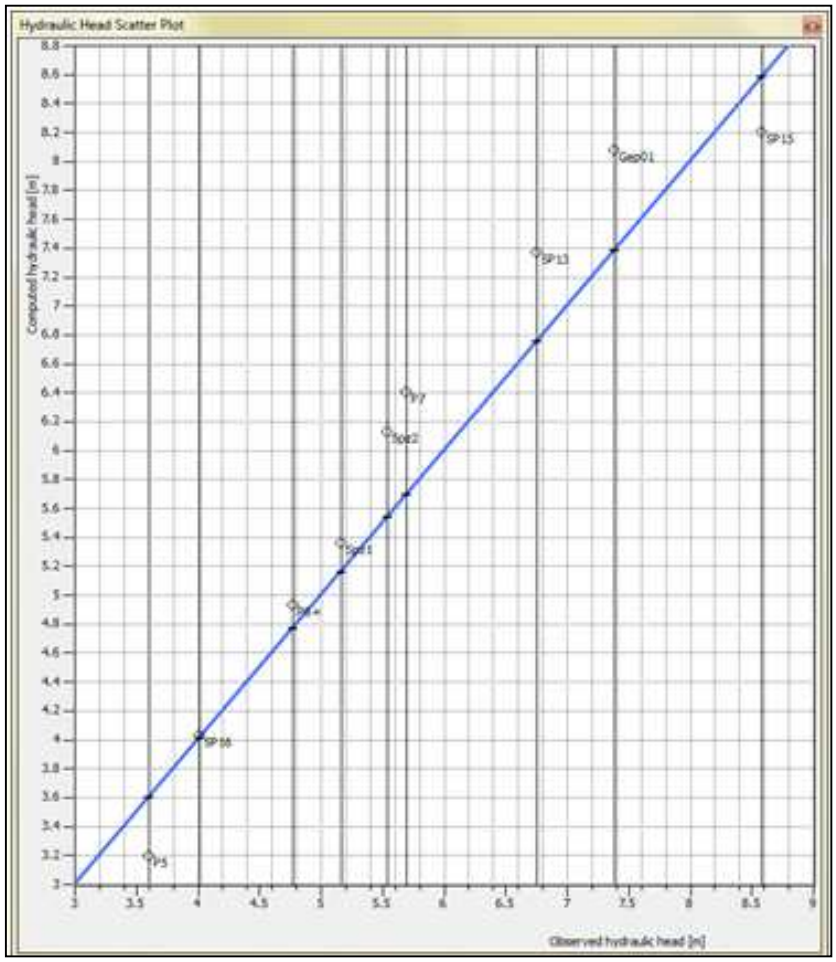


Figura 7-1- Retta di calibrazione del modello numerico in stato stazionario. Sono riportati in ascisse i valori di quota piezometrica misurati in campo ed in ordinate quelli calcolati mediante modello numerico ai punti di controllo.

Nella figura seguente si riporta la soluzione del modello numerico in termini di quote piezometriche (riferite al livello medio del mare).

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

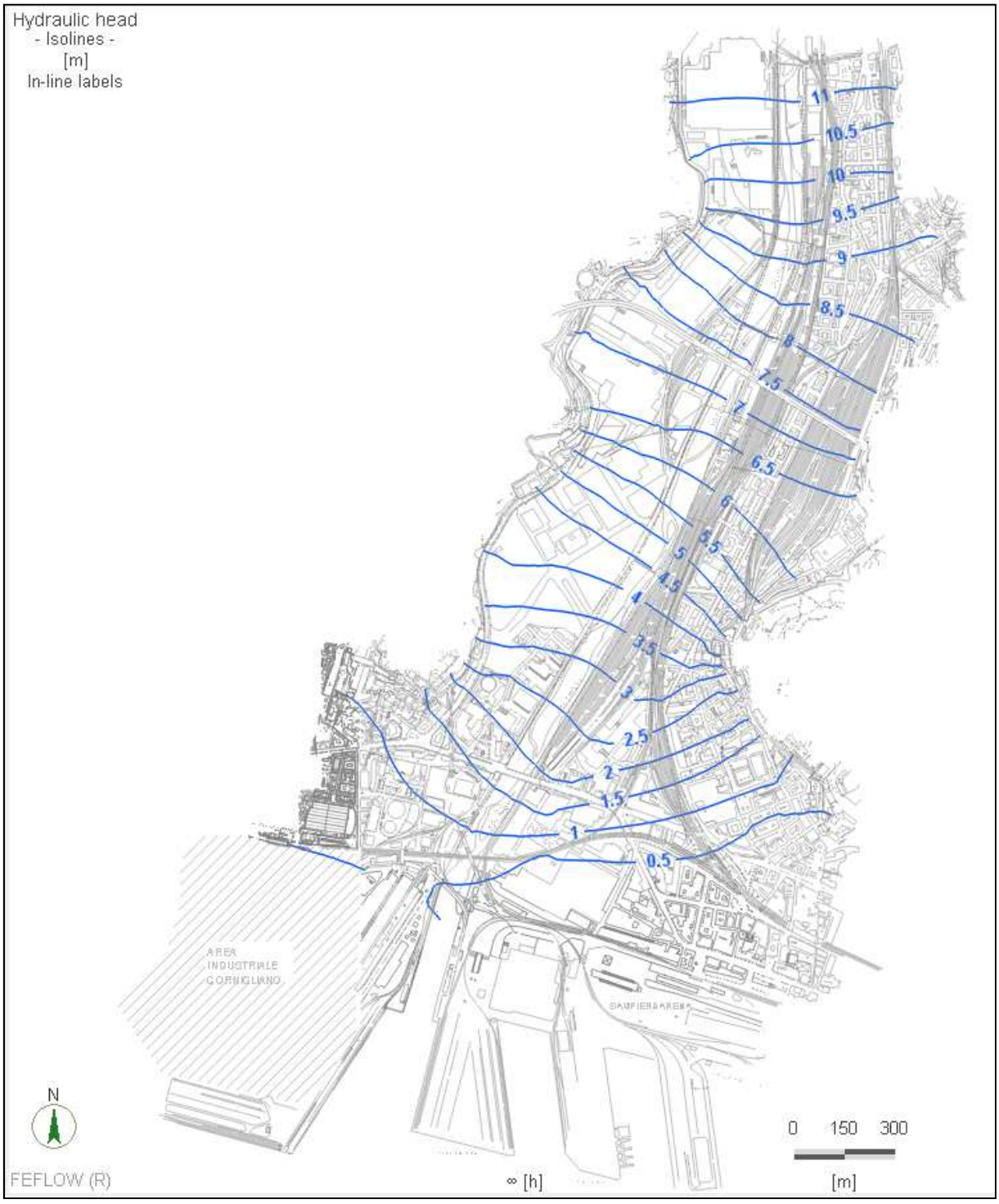


Figura 7-2- Soluzione del modello numerico in stato stazionario

7.3 Calibratura del modello in stato transitorio – Ricostruzione della prova di pompaggio

Al fine di verificare il comportamento del modello non solo in condizioni stazionarie ma anche in condizioni dinamiche ed in stato transitorio sono stati determinati i valori del coefficiente di immagazzinamento che hanno consentito di replicare (simulando l'emungimento da un punto pozzo) valori di abbassamento misurati durante la prova di pompaggio effettuata nel Settembre 2014.

Tali analisi hanno contribuito, con i loro risultati, a meglio definire i parametri di conducibilità idraulica da assegnare ai materiali dell'acquifero.

Per quanto riguarda la descrizione dettagliata delle prove eseguite e dei risultati ottenuti si rimanda all'Allegato 10 alla relazione generale di VIA (report tecnico delle prove di pompaggio).

In sostanza è stato simulato un pompaggio della medesima durata di quello della prova di pompaggio (circa 46h) ad una portata pari a quella realmente utilizzata (105 l/s). In corrispondenza delle posizioni dei punti di controllo Pc1 e Pc2 sono stati registrati i valori degli abbassamenti calcolati dal modello numerico. Come avvenuto nella realtà.

Di seguito (Figura 7-3 e Figura 7-4) si riportano i grafici di confronto tra le curve di abbassamento misurate in campo per i piezometri di controllo Pc1 e Pc2 e quelle calcolate mediante modello numerico (avendo cura di utilizzare i valori calcolati relativi ai layer rappresentativi delle effettive profondità di fenestratura dei piezometri di riferimento).

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

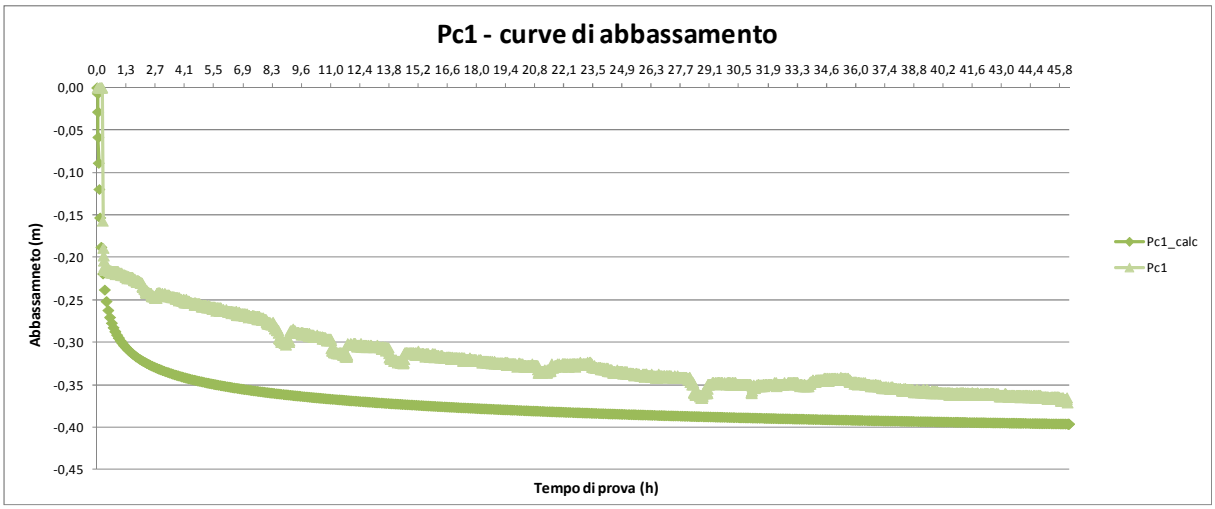


Figura 7-3 – Confronto tra valori di abbassamento calcolati e misurati per il punto di controllo Pc1.

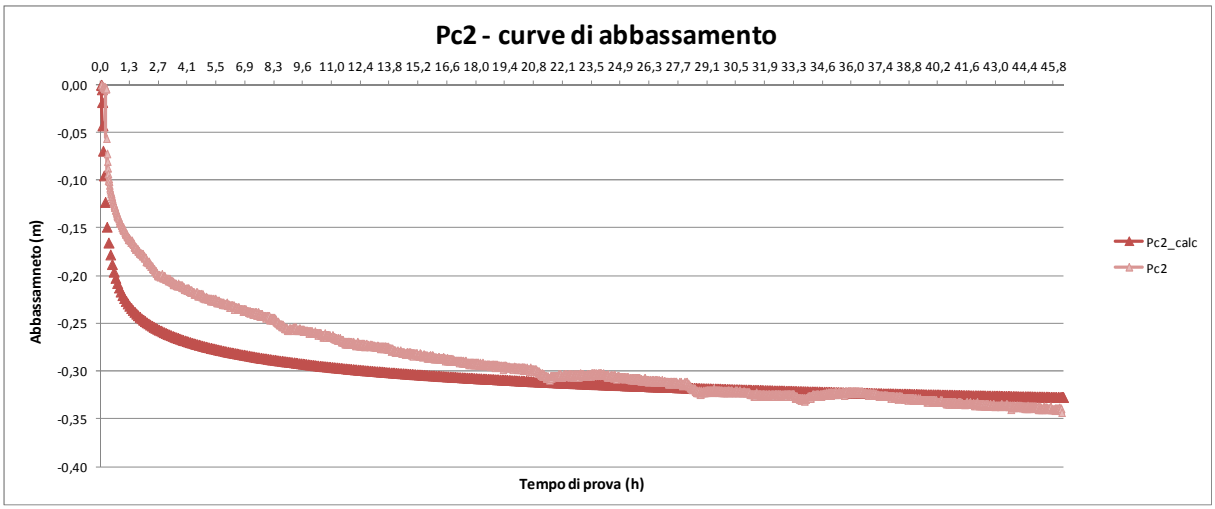


Figura 7-4 – Confronto tra valori di abbassamento calcolati e misurati per il punto di controllo Pc2.

Nella Figura 7-5 seguente sono riportate le curve di abbassamento, calcolate e misurate, dei punti di P4 ed Spz2.

Sebbene tali curve non siano state oggetto di calibrazione (P4, distante circa 20 m, in quanto si tratta di un pozzo fenestrato su più livelli, a doppia tubazione da 500mm di diametro ed armato con pompa di emungimento; Spz2 in quanto distante circa 40 m) è possibile osservare che il modello approssima abbastanza bene il punto P4 (con un errore di circa 4 cm) mentre per il punto Spz2 vi è un errore nell'abbassamento finale di circa 7 cm.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

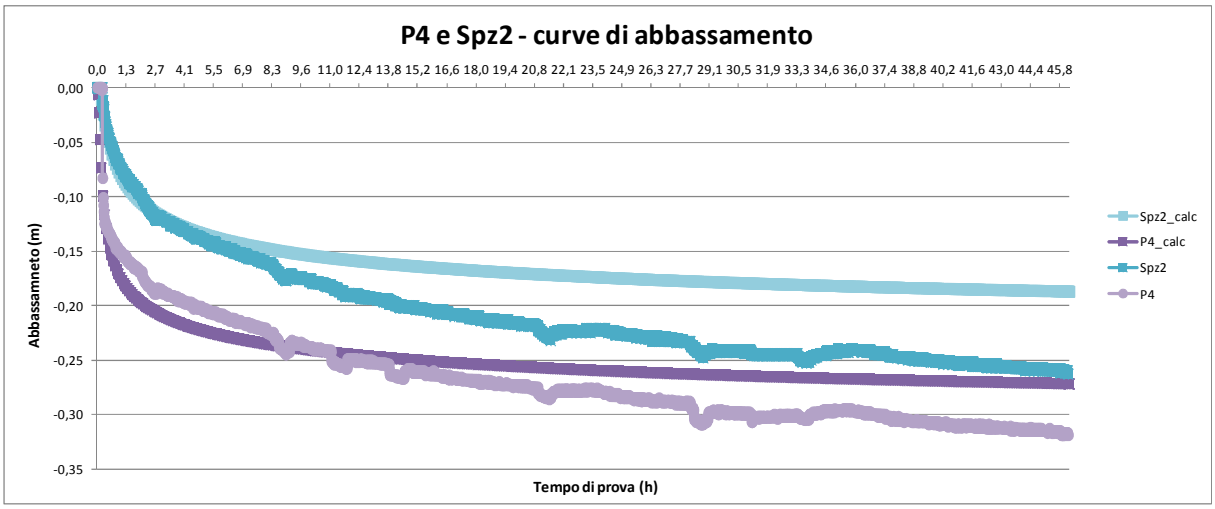


Figura 7-5 – Confronto tra valori di abbassamento calcolati e misurati per i punti di controllo P4 ed Spz2.

Nella seguente Tabella 7-2 si riportano i dati relativi agli abbassamenti finali calcolati confrontati con quelli misurati in campo. Sono evidenziate le differenze sia in centimetri che in termini di percentuale rispetto all'abbassamento misurato. Per i punti di controllo Pc1 e Pc2 si sono ottenute differenze inferiori al 10% del valore totale di abbassamento misurato su ciascun punto.

Punti di controllo	Abbassamenti misurati (cm)	Abbassamenti calcolati (cm)
Pc1 (inf)	37	40
Pc2 (sup)	34	33
P4 (sup/inf)	31	27
SPZ2 (sup)	26	19
Differenza calcolato/misurato (cm)		
Pc1 (inf)	3	
Pc2 (sup)	-1	
P4 (sup/inf)	-4	
SPZ2 (sup)	-7	
Differenza calcolato/misurato (%)		
Pc1 (inf)	8,1%	
Pc2 (sup)	-2,9%	
P4 (sup/inf)	-12,9%	
SPZ2 (sup)	-26,9%	

Tabella 7-2- Calibratura del modello numerico in stato transitorio. In tabella sono riportati gli abbassamenti ai punti di controllo, calcolati e misurati.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

Di seguito, in Tabella 7-3 , sono riassunti (con riferimento alle due porzioni dell'acquifero individuate) i valori definitivi di calibratura in stato transitorio del modello numerico confrontati con quelli provenienti dall'interpretazione della prova di pompaggio

Interpretazione prova di pompaggio	K (m/s)	6,29E-03	Parametri modello numerico	Kh Sup (m/s)	6,00E-03
				Kv Sup (m/s)	5,00E-04
				Kh Inf (m/s)	8,50E-03
	Sy (-)	4,05E-01		Kv Inf (m/s)	8,50E-03
				Sy (-)	0,5/0,01

Tabella 7-3 - Confronto tra i parametri idrogeologici provenienti dall'interpretazione della prova di pompaggio ed i parametri di simulazione inseriti nel modello numerico.

7.4 Simulazione del trasporto di soluti.

Come anticipato nel Paragrafo 3.5, il numero di punti per il quale sono risultate disponibili misure di conducibilità elettrica è esiguo; i punti in oggetto sono per la maggior parte vicini tra loro (Pc1, Pc2 ed Spz2 oppure P1bis e P6), non distribuiti uniformemente sull'intero dominio della modellazione e, comunque, le misure non sono riferite tutte al medesimo periodo.

Ciò non ha consentito una calibrazione della parte di modello relativa al trasporto dei soluti.

Tuttavia i dati a disposizione hanno consentito, nel loro complesso, di ricostruire lo stato qualitativo delle acque di falda, relativamente alla contaminazione da parte dell'acqua di mare, consentendo di individuare un valore indicativo in ingresso all'area di studio e di stimare un range di valori all'interno del quale varia la concentrazione di TDS per i restanti punti.

Il valore di concentrazione per il flusso entrante nel modello numerico da monte è stato posto pari a quello medio del punto GEP03 (ricavato come media dell'intero dataset disponibile per il punto) e pari, dunque, a 285 mg/l ca. di TDS (cfr. Par. 3.5).

Il range in cui ricadono i valori di TDS per i restanti punti è, invece: 240÷305 mg/l.

Come valore di concentrazione dei TDS in corrispondenza della linea di costa è stato, invece, adottato il valore di 38000 mg/l (cfr. Par. 3.6).

Per quanto attiene i parametri di dispersività (longitudinale e trasversale) occorre ricordare che essa costituisce un parametro molto variabile in funzione della scala del modello e dell'eterogeneità dell'acquifero. Per problemi riferiti a scale regionali

(lunghezza di riferimento dell'ordine di 1 km) il valore della dispersività può variare da 1 m a 100 m (cfr. Doc. [13]). Il valore di dispersività longitudinale è stato assunto pari a 50 m in considerazione delle dimensioni del problema e di alcuni dati riportati in letteratura per acquiferi aventi caratteristiche analoghe a quelle dell'acquifero studiato. Il valore di dispersività trasversale è stato assunto pari 15 m.

Tutte le simulazioni condotte (cfr. Capitolo 8 seguente), sia in transitorio che in stazionario, hanno mostrato per l'area in cui ricadono i punti di controllo, sempre un valore uniforme di concentrazione di circa 285 mg/l, ciò a dimostrazione del fatto che, come intuibile, il trasporto in un acquifero caratterizzato da elevate conducibilità idrauliche come quello in oggetto è sostanzialmente regolato dalla componente advettiva dovuta al flusso idraulico sotterraneo che, giungendo ad una situazione di equilibrio con le condizioni al contorno di valle e con lo stato di pressione antropica (emungimenti), mostra valori di TDS (si legga di conducibilità elettrica, cfr. Par. 3.5) abbastanza uniformi per l'area in studio.

Per i soluti è stato adottato un valore di diffusione molecolare pari a 10^{-9} m^2/s.

Nella seguente tabella si riporta il confronto tra i valori di concentrazione di TDS ai punti di controllo disponibili ed il valore di equilibrio sempre raggiunto dal modello.

La media degli scarti è pari a circa 2mg/l mentre la media degli scarti in valore assoluto è pari a circa 25 mg/l.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

MEDIA GEP03 anni 2001-2012			
Conducibilità elettrica (µS/cm)		419	
TDS (mg/l)		284,92	
Valore TDS in ingresso al modello/valore uniforme di equilibrio nell'area dei punti di controllo (mg/l)	**Differenza rispetto ai valori TDS desunti dalla conducibilità elettrica misurata (mg/l)**	**Punto di misura**	**Data**
285	-25,24	GEP01	mag-12
	-29,32	GEP01	ago-12
	20,32	GEP02	mag-12
	13,52	GEP02	ago-12
	-6,2	GEP03	mag-12
	-32,72	GEP03	ago-12
	42,76	Rubinetto ILVA	giu-10
	39,36	Pozzi	dic-09
	17,6	Pozzi 4/7	giu-08
	40,04	Pozzi	lug-08
	0,6	P5	giu-14
	4,68	P6	giu-14
	14,88	SP16	giu-14
	13,52	SPZ1	giu-14
	-25,92	SPZ1	giu-14
	-44,96	SPZ2	giu-14
	-32,72	Pc1	giu-14
	-31,36	Pc2	giu-14

Tabella 7-4 - Confronto tra i valori di concentrazione di TDS (calcolati a partire dai valori misurati di conducibilità elettrica, cfr. Par. 3.5) ai punti di controllo disponibili ed il valore di equilibrio sempre raggiunto dal modello numerico.

È probabile che la fascia di territorio prospiciente la linea naturale di costa sia caratterizzata da valori di conducibilità elettrica e concentrazioni di TDS (sali disciolti) via via più elevate man mano che ci si avvicina al mare.

Tuttavia, nei limiti della semplificazione effettuata con la modellazione numerica, le simulazioni condotte mostrano che l'esercizio del campo pozzi a pieno regime (riferito alla nuova portata totale richiesta in concessione, 600 l/s) non andrebbe ad alterare tale situazione.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

8. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI PROVENIENTI DALL'EMUNGIMENTO PROLUNGATO OPERATO DAL CAMPO POZZI ILVA

8.1 Generalità

Con la finalità di valutare l'impatto del campo pozzi Ilva sulla qualità delle acque di falda durante tutto l'anno è stato simulato uno scenario che prendesse in considerazione tanto le condizioni di grassa e di magra del sistema idro-geologico quanto uno stato di pressione antropica (operata dal campo pozzi) che potesse risultare la più cautelativa possibile.

A tale scopo è stato simulato un orizzonte temporale di cento anni nel quale sono state ciclicamente imposte le condizioni di grassa e di magra del torrente (quest'ultima per quattro mesi all'anno, come illustrato nel Paragrafo 6.1).

Come stato di pressione è stato simulato un emungimento continuato dai pozzi del campo Ilva per un totale di 600 l/s (suddivisi tra i cinque attuali pozzi). Analogamente è stata simulata anche l'attività continua dei vicini pozzi Erzelli per un totale di 50 l/s.

Tale condizione risulta senz'altro cautelativa in quanto ipotizza un funzionamento ininterrotto al massimo della nuova portata di derivazione per la quale si richiede concessione.

8.2 Risultati delle simulazioni

Il modello numerico mostra una limitata ingressione del fronte di acqua con caratteristiche di salinità differenti da quelle dell'acqua dolce.

Tuttavia tale fronte (indicativamente si consideri l'isolinea dei 300 mg/l di TDS, scelta per motivi grafici di generazione delle isolinee, come valore prossimo a quello della concentrazione delle acque in ingresso da monte, 285 mg/l) non arriva a superare i 500 m circa dalla linea naturale di costa (si prenda come riferimento la via Pieragostini). Oltre tale riferimento non si osservano incrementi della concentrazione di soluti eccedenti i valori utilizzati in ingesso al modello da monte. E ciò tanto in condizioni di grassa che in condizioni di magra della falda e del regime idrologico del Polcevera (quattro mesi estivi).

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

Tra i due regimi considerati (cfr. Figura 8-1e Figura 8-2 seguenti, riferite rispettivamente ad una condizione di grassa e magra) si osservano, invece, differenze più marcate nell'avanzamento delle iso-linee di concentrazione di valore più elevato (ad esempio si consideri la iso-linea dei 15000 mg/l), dell'ordine di qualche decina di metri.

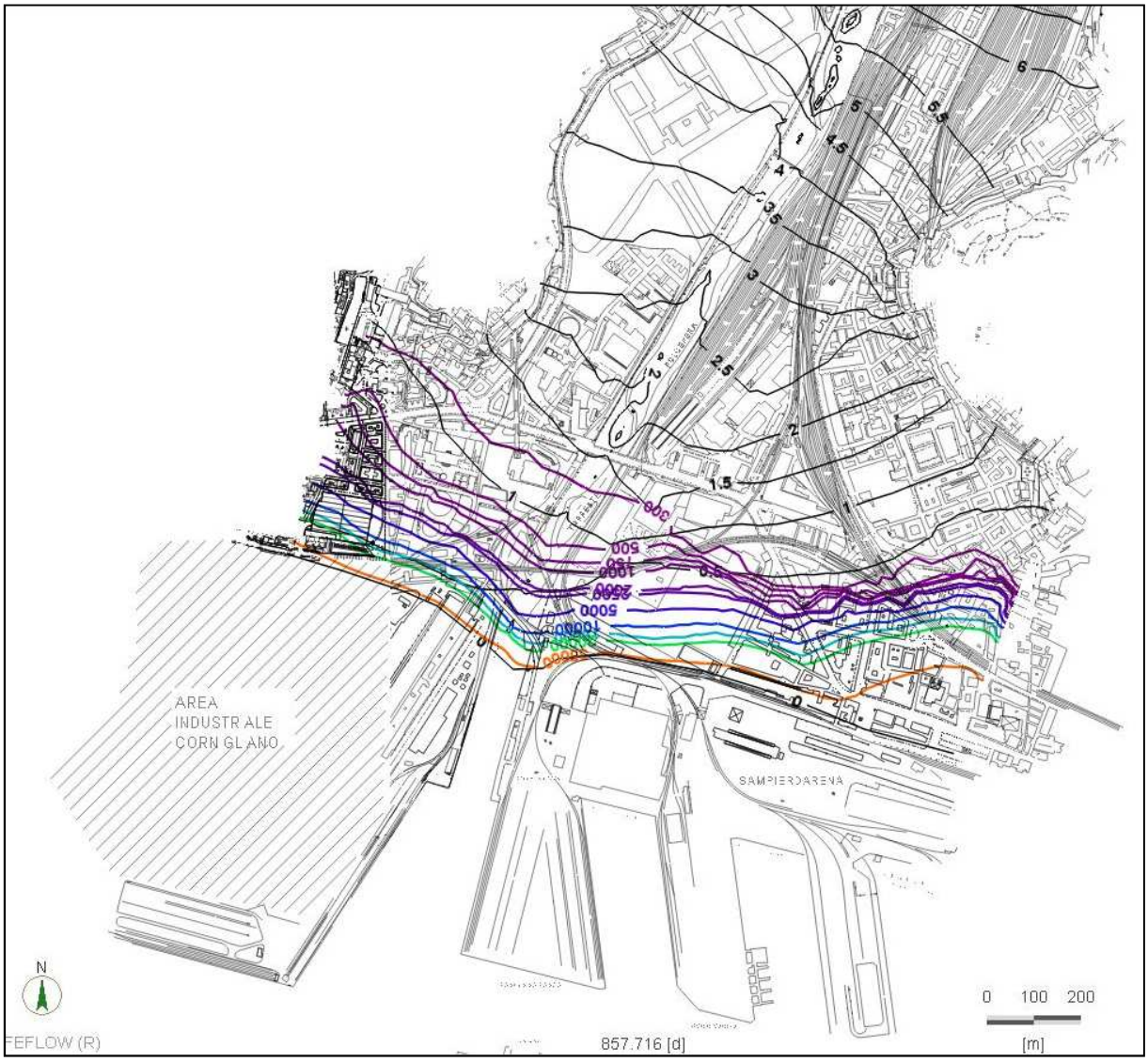


Figura 8-1-Soluzione del modello numerico di flusso e trasporto per il layer 2 (superficiale). Simulazione di condizioni di grassa della falda. Come è possibile osservare l'isolinea di riferimento dei 300mg/l di TDS si arresta all'altezza della Via Pieragostini.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

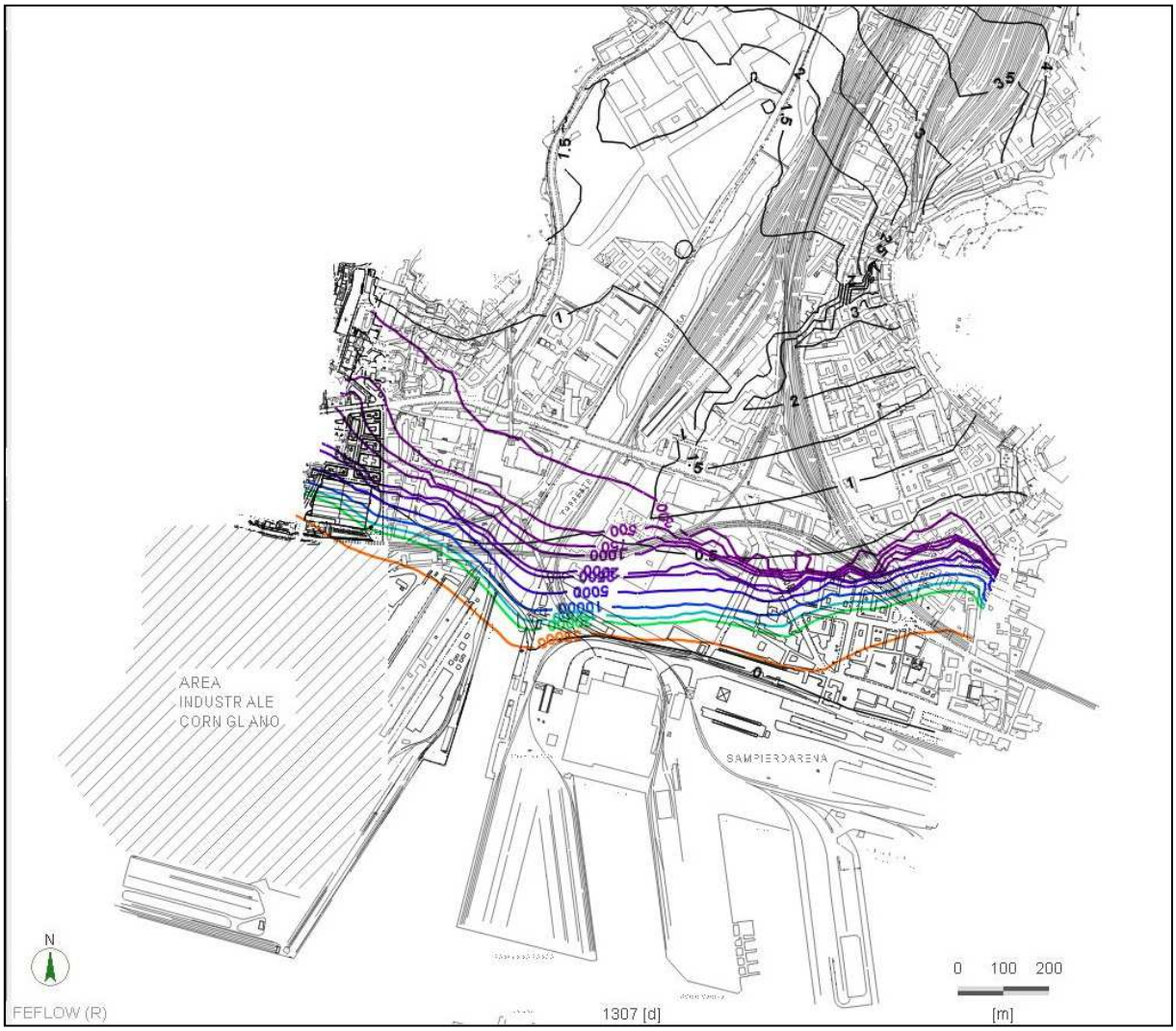


Figura 8-2-Soluzione del modello numerico di flusso e trasporto per il layer 2 (superficiale). Simulazione di condizioni di magra della falda. Come è possibile osservare l'isolinea di riferimento dei 300mg/l di TDS si arresta all'altezza della Via Pieragostini.

Il modello mostra inoltre, nell'area sud-orientale della foce, un differente comportamento tra gli strati più superficiali e quelli più profondi (si confrontino la Figura 8-3 e la Figura 8-4 seguenti riferite, rispettivamente, alle condizioni di grassa e di magra). Il fronte del cuneo salino risulta essere , infatti, molto più arretrato rispetto all'area occidentale.

Tale risposta del modello numerico è imputabile alla presenza della formazione di materiali fini limoso-argillosa esistente in quest'area e che costituisce un efficace schermo all'intrusione del cuneo salino ed è possibile osservarne l'effetto di schermatura nella parte bassa dell'acquifero. Rimane fermo quanto osservato per il fronte più interno dei soluti (iso-linea dei 300 mg/l) in rapporto alla massima distanza dalla linea di costa naturale.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI



Figura 8-3-Soluzione del modello numerico di flusso e trasporto per il layer 9 (profondo). Simulazione di condizioni di grassa della falda. Come è possibile osservare l'isolinea di riferimento dei 300mg/l di TDS si arresta all'altezza della Via Pieragostini.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI



Figura 8-4-Soluzione del modello numerico di flusso e trasporto per il layer 9 (profondo). Simulazione di condizioni di magra della falda. Come è possibile osservare l'isolinea di riferimento dei 300mg/l di TDS si arresta all'altezza della Via Pieragostini.

è vietata la riproduzione di questo documento, senza preventiva autorizzazione scritta dello SGI
reproduction of this document is forbidden without prior written permission of SGI

9. CONCLUSIONI

Nel procedimento di rinnovo della concessione per la derivazione di acque sotterranee per uso industriale da parte di Ilva S.p.A. si è ritenuto necessario effettuare, in sede di Valutazione di Impatto Ambientale, delle analisi finalizzate a valutare l'impatto che l'esercizio del campo pozzi Ilva potrebbe avere sulla qualità della acque di falda.

A tale scopo è stato implementato un modello numerico di flusso e trasporto in stato transitorio per valutare l'eventuale accentuarsi del fenomeno dell'ingressione del cuneo salino in condizioni di magra della falda a causa degli emungimenti dai pozzi del campo Ilva.

Il modello numerico è stato calibrato sulla base dei dati disponibili.

È stata quindi condotta una simulazione fortemente cautelativa nella quale, per un orizzonte temporale di cento anni, si è ipotizzato che a fronte del ciclo grassa-magra naturale della falda e del torrente Polcevera venga costantemente attuato l'emungimento dai pozzi del campo Ilva per un totale di 600 l/s distribuiti tra i cinque pozzi esistenti (aumentata degli emungimenti di terzi, noti nell'area del campo pozzi Ilva, pozzi Erzelli).

La simulazione mostra, sia in situazione di grassa che di magra, che l'attività del campo pozzi non altera lo stato attuale della qualità delle acque di falda almeno fino al punto P5, il pozzo del campo Ilva posizionato più a valle.

D'altro canto, se si considera il valore di conducibilità elettrica riportato in normativa per le acque potabili (2500 µS/cm, cui corrisponde un valore indicativo di TDS pari a 1700 mg/l, cfr. Doc. [26]) si può concludere che la situazione peggiore tra quelle simulate è, comunque, ben lontana da quella limite per la qualità di acque destinate al consumo umano.