

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

Modellazione numerica del flusso e del trasporto  
per l'applicazione integrata di geotermia a bassa  
entalpia e bonifica

Candidato:  
Francesco Giovanni  
Galizia

Relatore:  
Dott.ssa Maria Filippini

Correlatore:  
Dott. Gabriele Cesari



*Alla mia famiglia*

# Indice

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	7
<b>2. INQUADRAMENTI</b> .....	9
2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO .....	10
2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	11
2.2.1 Il Supersistema Emiliano-Romagnolo .....	12
2.2.2 Il Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES).....	13
2.3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO .....	15
2.3.1 Acquifero A0 .....	18
2.4 CONTAMINAZIONE DA ORGANOCOLORATI .....	20
2.4.1 Non Aqueous Phase Liquid (NAPL) e partizione multifase .....	22
2.4.2 Meccanismi di degradazione degli organocolorati .....	24
2.4.3 Campi di utilizzo degli organocolorati .....	25
2.5 PUMP & TREAT .....	26
2.5.1 Materiali adsorbenti .....	27
2.6 IMPIANTI GEOTERMICI A BASSA ENTALPIA .....	30
2.6.1 Impianti geotermici <i>open-loop</i> .....	31
2.6.2 Pompe di calore .....	33
<b>3. MATERIALI E METODI</b> .....	36
3.1 APPROCCIO DI LAVORO .....	37
3.2 METODI DI INTERPOLAZIONE DEI DATI PIEZOMETRICI E DI CONCENTRAZIONE DEI CONTAMINANTI .....	39
3.3 RICARICA & CALCOLO DEL REGIME IDROLOGICO .....	41
3.3.1 Stima dell'evapotraspirazione e determinazione della precipitazione efficace .....	42
3.3.2 Determinazione di $CIP_g$ e $CIP_{ps}$ .....	43
3.4 MODELLAZIONE NUMERICA DI FLUSSO E TRASPORTO .....	45
3.4.1 Il codice Modflow .....	46
3.4.2 Il codice Mt3dms .....	50
3.4.3 I modelli di calore e il codice Modpath .....	52
3.5 DIMENSIONAMENTO DI UN IMPIANTO GEOTERMICO OPEN-LOOP .....	53
3.6 ANALISI DEI COSTI .....	55
<b>4. PRESENTAZIONE DEI DATI</b> .....	57
4.1 BREVE CRONISTORIA DELLE INDAGINI NEL SITO DI STUDIO .....	58
4.2 SINTESI DELLE INDAGINI GEOLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE PREGRESSE .....	60
4.2.1 Sondaggi e sezioni geologiche .....	61
4.2.2 Slug test .....	64
4.2.3 Monitoraggio dei livelli piezometrici .....	64
4.3 VALORI TERMO-PLUVIOMETRICI CONSIDERATI .....	66
4.4 CONTAMINAZIONE PRESSO IL SITO DI STUDIO .....	67
4.5 BONIFICA ED IMPIANTO PUMP AND TREAT .....	70

<b>5. ELABORAZIONE DEI DATI</b> .....	74
5.1 INTERPOLAZIONI .....	75
5.1.1 Interpolazione dei carichi piezometrici.....	75
5.1.2 Interpolazione delle concentrazioni di contaminanti .....	76
5.2 STIMA DELLA RICARICA.....	78
5.3 MODELLAZIONE NUMERICA .....	78
5.3.1 Discretizzazione del dominio e creazione della griglia .....	79
5.3.2 Carico Costante e Ricarica .....	81
5.3.3 Pozzi di pompaggio ed immissione .....	82
5.3.4 Dispersività, coefficienti di diffusione molecolare e coefficienti di partizione .....	83
5.3.5 Schema temporale dei modelli .....	85
5.3.6 Caratteristiche specifiche del modello allo stato stazionario .....	86
5.3.7 Caratteristiche specifiche del modello allo stato transitorio “semplificato” .....	88
5.3.8 Caratteristiche specifiche del modello allo stato transitorio “complesso” .....	90
5.3.9 Sintesi di tutti i dati utilizzati per l’implementazione dei modelli .....	90
<b>6.RISULTATI DELLA MODELLAZIONE E DISCUSSIONE</b> .....	92
6.1 MODELLO STAZIONARIO.....	93
6.1.1 Andamento piezometrico.....	93
6.1.2 Valutazione dello schema di pompaggio e di eventuali fenomeni di corto-circuitazione termica.....	95
6.1.3 Trasporto dei contaminanti (TCE e 1,1-DCE).....	99
6.2 MODELLO TRANSITORIO .....	103
6.2.1 Effetti del pompaggio e dell’immissione nel tempo .....	103
6.2.2 Trasporto dei contaminanti ed effetti della bonifica .....	107
6.3 CALCOLO DELLA POTENZA DELL’IMPIANTO GEOTERMICO .....	111
6.4 ANALISI DEI COSTI .....	112
<b>7.CONCLUSIONI</b> .....	114
BIBLIOGRAFIA.....	116
RINGRAZIAMENTI .....	122
APPENDICI .....	123



## RIASSUNTO

L'obiettivo che si pone questo lavoro è quello di combinare in un unico impianto due tecnologie utilizzate per scopi differenti: un impianto di climatizzazione geotermico a bassa entalpia di tipo *open-loop* ed un impianto di bonifica delle acque di falda di tipo *Pump and Treat*. Il sito selezionato per lo studio è ubicato in via Lombardia, nell'area industriale di Ozzano dell'Emilia (BO), ed è definito "Ex stabilimento Ot-Gal": si tratta di una galvanotecnica con trattamento di metalli, dismessa alla fine degli anni '90. Durante una precedente fase di caratterizzazione del sito condotta dalla ditta Geo-Net S.r.l., sono stati rilevati in falda dei superamenti delle CSC previste dal D.lgs. 152/2006 di alcuni contaminanti, in particolare Tricloroetilene (TCE) e 1,1-Dicloroetilene (1,1-DCE). Successivamente, nel 2010-2011, Geo-net s.r.l. ha eseguito una parziale bonifica delle acque di falda attraverso l'utilizzo di un impianto *Pump and Treat*. Grazie a tutti i dati pregressi riguardanti i monitoraggi, le prove e i sondaggi, messi a disposizione per questo studio da Geo-Net s.r.l., è stato possibile eseguire una sperimentazione teorica, in forma di modellazione numerica di flusso e trasporto, dell'impianto integrato oggetto di studio. La sperimentazione è stata effettuata attraverso l'utilizzo di modelli numerici basati sul codice di calcolo MODFLOW e su codici ad esso comunemente associati, quali MODPATH e MT3DMS. L'analisi dei risultati ottenuti ha permesso di valutare in modo accurato l'integrazione di queste due tecnologie combinate in unico impianto. In particolare, è stata simulata una durata di vita dell'impianto integrato pari a 20 anni. Il pompaggio e la rimmissione richiesti per il condizionamento sono risultati sostenibili per l'acquifero studiato per tutta il periodo d'esercizio dell'impianto. La bonifica all'interno del sito avviene dopo 15 dalla messa in attività, in quanto si registrano valori di concentrazione inferiori alle CSR. Sono stati anche confrontati i costi da sostenere per la realizzazione e l'esercizio dell'impianto integrato rispetto a quelli di un impianto tradizionale. Tale confronto ha mostrato che l'ammortamento dell'impianto integrato (geotermia e bonifica) avviene in 13 anni e che i restanti 7 anni di esercizio producono un risparmio economico rispetto ad una soluzione tradizionale.

# 1. INTRODUZIONE

Attualmente sono presenti vari sistemi utilizzati per la produzione di energia termica per il condizionamento di edifici pubblici e privati. Tra questi, una tecnologia relativamente recente e a basso impatto è rappresentata dagli impianti geotermici a bassa entalpia. Questi impianti sono utilizzati per la climatizzazione degli edifici e sono in grado di soddisfare sia il fabbisogno di riscaldamento nel periodo invernale, sia quello di raffrescamento nel periodo estivo e di produrre acqua calda sanitaria. Il sistema offre un contributo molto importante per ridurre sia le spese di gestione e sia gli impatti derivanti dall'uso dei combustibili fossili. Gli impianti alimentati con questa risorsa risultano essere di semplice gestione in termini di manutenzione e permettono, in condizioni favorevoli, di rinunciare quasi completamente alle risorse fossili.

In particolare gli impianti geotermici a bassa entalpia *open-loop* sono costituiti da uno scambiatore di calore a circuito aperto (*open-loop*) che prevede l'estrazione e restituzione in falda dell'acqua contenuta in un acquifero, attraverso appositi pozzi. Tale tipologia di impianto, abbinato ad un'idonea pompa di calore, sfrutta la capacità di scambio termico propria dell'acqua di falda, a vantaggio di un ridotto consumo di energia ed un minor impatto ambientale complessivo.

L'obiettivo che si pone questo lavoro è quello di investigare la possibilità di associare in un unico impianto due tecnologie utilizzate per scopi differenti: un impianto di climatizzazione geotermico a bassa entalpia di tipo *open-loop* ed un impianto di bonifica delle acque di falda di tipo *Pump and Treat*. Tale associazione permetterebbe di accrescere ulteriormente i vantaggi associati all'utilizzo della tecnologia *open-loop*, estendendoli anche alla bonifica di una eventuale contaminazione in falda. Per fare questo, è stata eseguita una sperimentazione teorica, in forma di modellazione numerica del flusso e trasporto di contaminanti in falda, utilizzando dati provenienti dalla caratterizzazione pregressa di un sito potenzialmente adatto all'applicazione integrata qui investigata. I dati riguardanti il sito sono stati messi a disposizione dalla ditta Geo-Net s.r.l., e riguardano un sito contaminato da organoclorurati, già parzialmente bonificato nel 2010-2011.

Il sito oggetto di studio è ubicato in via Lombardia, nell'area industriale di Ozzano dell'Emilia (BO), ed è denominato "Ex stabilimento Ot-Gal": si tratta di una galvanotecnica con trattamento di metalli, dismessa alla fine degli anni '90. In questo sito, durante la fase di caratterizzazione avvenuta negli anni (2005-2010) da parte di Geo-Net s.r.l., sono stati rilevati dei superamenti delle CSC previste dal D.lgs. 152/2006 di alcuni contaminanti, in particolare Tricloroetilene (TCE) e 1.1-Dicloroetilene (1.1-DCE). A partire da settembre 2010 e per l'anno seguente, è stata eseguita da Geo-Net s.r.l. una parziale bonifica delle acque di falda attraverso l'utilizzo di un impianto *Pump and Treat*.

L'indagine teorica è stata effettuata attraverso l'implementazione di modelli numerici idrogeologici basati sul codice di calcolo MODFLOW, uno dei codici di calcolo alle differenze finite attualmente più utilizzati per simulare il flusso di falda. Sono stati utilizzati anche altri codici di calcolo, comunemente associati al codice MODFLOW, quali MODPATH, per ricostruire i percorsi e le velocità di filetti fluidi e MT3DMS, per simulare il trasporto advettivo-dispersivo degli inquinanti. L'analisi dei risultati ottenuti ha permesso di valutare in modo accurato l'integrazione di queste due tecnologie combinate in un unico impianto. In termini economici, sono stati inoltre confrontati i costi da sostenere per la realizzazione e l'esercizio dell'impianto integrato rispetto a quelli di un impianto tradizionale.

Il presente studio è strutturato in 7 capitoli:

1. La presente **Introduzione**;
2. **Inquadramenti**: vengono esposti gli inquadramenti geografico, geologico, idrogeologico del sito oggetto di studio. Inoltre vengono introdotte e descritte le principali caratteristiche degli inquinanti presenti, nonché il funzionamento degli impianti geotermici a bassa entalpia e la tecnica di bonifica Pump & Treat;
3. **Materiali e metodi**: in questo capitolo vengono esposti tutti i metodi e le tecniche utilizzate per l'elaborazione dei dati di base, inclusi i codici di calcolo numerico adoperati;
4. **Presentazione dei dati**: in questo capitolo vengono esposti tutti i dati pregressi forniti da Geo-Net s.r.l., raccolti durante le fasi di caratterizzazione e bonifica del sito (tali dati sono stati poi stati sfruttati per l'implementazione dei modelli numerici);
5. **Elaborazione dei dati**: vengono illustrate le elaborazioni applicate ai dati di base, al fine di ottenere le informazioni necessarie all'implementazione dei modelli numerici. Inoltre vengono descritte tutte le implementazioni dei modelli numerici di flusso e trasporto;
6. **Risultati della modellazione e discussione**: tutti i principali risultati della modellazione numerica di flusso e trasporto vengono qui interpretati e discussi;
7. **Conclusioni**: vengono sinteticamente riassunti i risultati fondamentali del lavoro svolto.

## **2.INQUADRAMENTI**

## 2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il sito oggetto di studio è ubicato in via Lombardia, nell'area industriale di Ozzano dell'Emilia (Bologna), ed è definito "Ex stabilimento Ot-Gal". Si tratta di una galvanotecnica con trattamento di metalli, dismessa alla fine degli anni '90. Il sito presenta una superficie di circa 4500 mq. In Figura 2.1 è mostrata la collocazione geografica del sito. Il contesto geografico e morfologico dell'area oggetto di studio è l'alta pianura padana ed in particolare esso è ubicato in corrispondenza dei depositi di conoide del torrente Quaderna. La quota media s.l.m. è pari a 46.6 metri. Il clima è caldo e temperato. Esiste una piovosità significativa durante tutto l'anno ed anche nel mese più secco si riscontra molta piovosità. Il clima secondo la classificazione di Köppen e Geiger è classificato come Cfa (clima temperato umido con estate calda). La temperatura media annuale è pari a 14.0 °C, mentre la piovosità media annuale è pari a 750 mm.

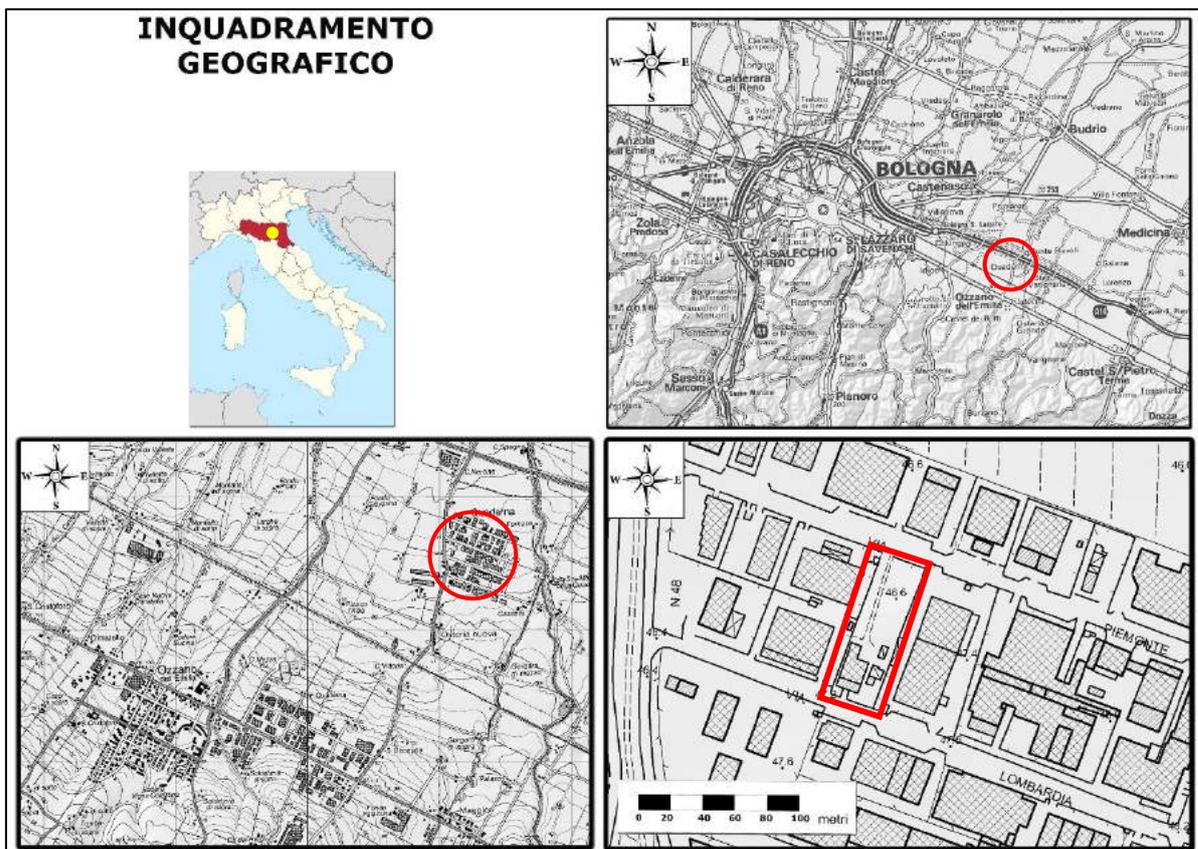


Figura 2.1: Collocazione geografica dell'area oggetto di studio.

## 2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il sito oggetto di studio ricade all'interno del bacino padano (Figura 2.2). L'evoluzione plio-quadernaria di quest'ultimo registra una tendenza regressiva (RICCI LUCCHI *et alii*, 1982).

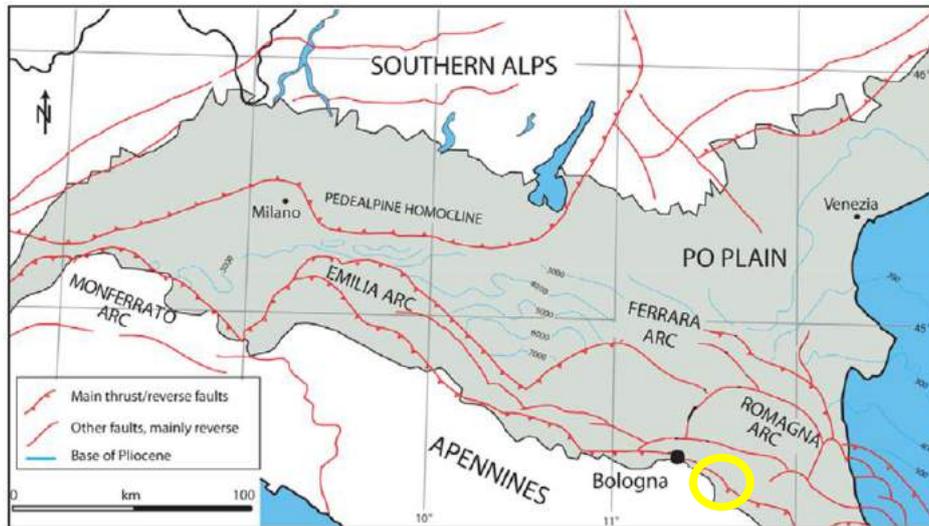


Figura 2.2: mappa strutturale semplificata della pianura padana (BURRATO *et al.*, 2003, modificata). Il cerchio di colore giallo indica l'area di studio.

L'ambiente di questo bacino all'inizio del Quaternario era di tipo marino di piattaforma. Dal Pleistocene medio in poi si registra una diminuzione progressiva del livello marino e una variazione dei processi sedimentari che da costieri passano a continentali. La deposizione quaternaria è quindi suddivisa in due fasi: il Ciclo  $Q_m$  di tipo marino e il Ciclo  $Q_c$  di tipo continentale (Figura 2.3). Quest'ultimo ciclo corrisponde all'unità stratigrafica del Supersistema Emiliano-Romagnolo e la sua base è marcata da una superficie di inconformità, associata ad una discordanza angolare, che separa i depositi alluvionali del ciclo  $Q_c$  dai sottostanti depositi marini  $Q_m$  (AMOROSI *et alii*, 1998a).

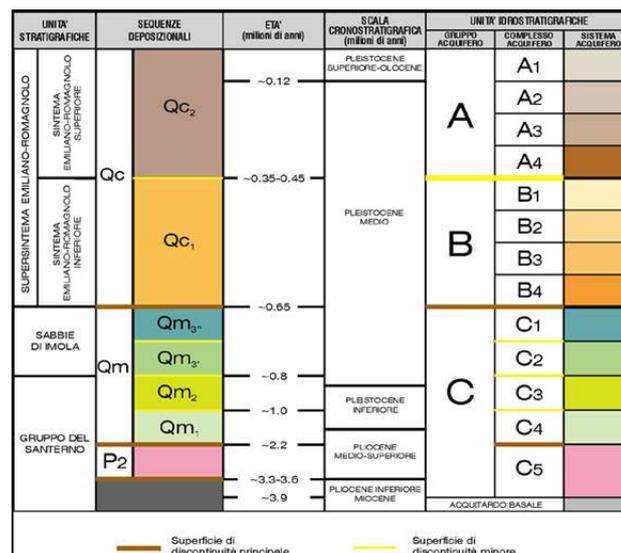


Figura 2.3: Schema stratigrafico e suddivisione stratigrafico-sequenziale dei depositi plio-quadernari del bacino padano (da CARTA GEOLOGICA D'ITALIA in scala 1:50000, Foglio 223, Ravenna - 2002).

### 2.2.1 Il Supersistema Emiliano-Romagnolo

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è l'unità stratigrafica che comprende l'insieme dei depositi quaternari di origine continentale affioranti al margine appenninico padano (Figura 2.4) e dei sedimenti ad essi correlati nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola. Questi ultimi comprendono depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini, organizzati in successioni cicliche di vario ordine gerarchico (PROGETTO CARG, 2009). L'età del Supersistema è attribuibile al Pleistocene medio – Olocene (650.000 anni B.P. – Attuale). Quest'unità si suddivide in due Sintemi, separati da una discordanza angolare:

Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES): caratterizzato da depositi di terrazzo, conoide e piana alluvionale. Le litologie presenti sono ghiaie, sabbie, limi e argille;

Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI): caratterizzato da un ambiente deposizionale di tipo alluvionale o costiero. Le litologie presenti sono prevalentemente fini, limi e argille alternate a sabbie e rare ghiaie.

All'interno dell'area di studio è presente soltanto il Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore.

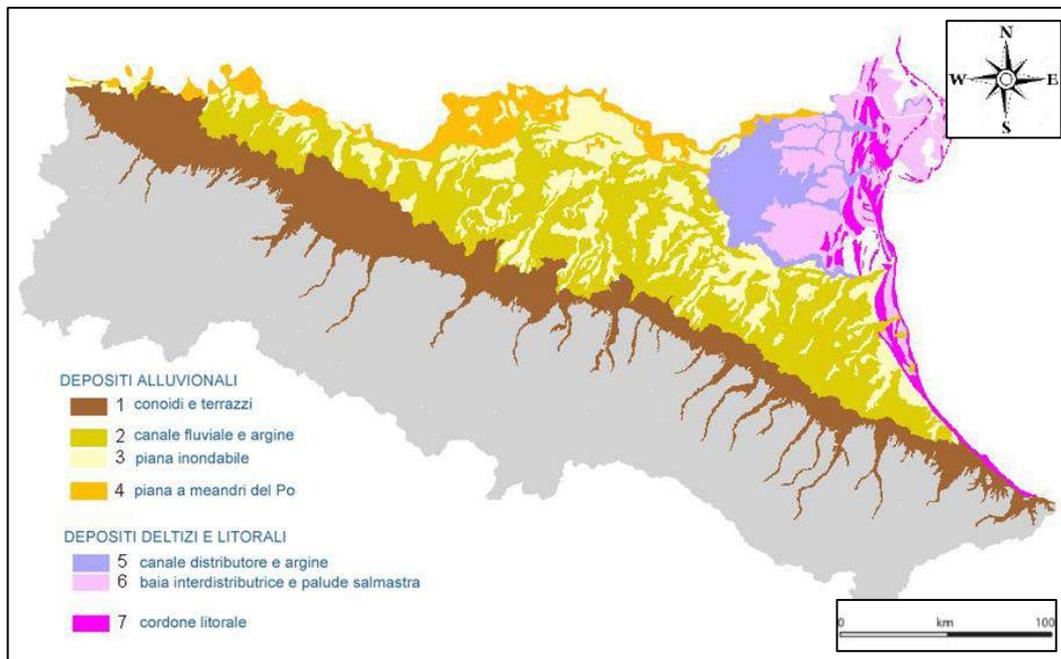


Figura 2.4: Carta Geologica di pianura dell'Emilia Romagna scala 1:250000. Bologna (REGIONE EMILIA ROMAGNA , 1999)

### 2.2.2 Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)

Il Sintema Emiliano-Romagnolo superiore (AES) presenta uno spessore che varia da pochi metri al margine appenninico fino a un massimo di 330 metri in corrispondenza della zona depocentrale. In Figura 2.5 viene mostrata una porzione di un sondaggio presente all'interno del foglio 221 Bologna analoga all'area oggetto di studio. Il limite superiore coincide con il piano topografico, mentre il limite inferiore è caratterizzato dalla superficie di discordanza angolare di pochi gradi che lo separa dai sottostanti depositi del Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI). Nelle porzioni intravallive e di margine appenninico, l'unità corrisponde a depositi terrazzati di piana alluvionale, costituiti da ghiaie e sabbie di canale fluviale, passanti ad alternanze di argille, limi e sabbie di piana inondabile. In particolare, nell'area di studio l'unità è costituita da sabbie limose, con rari livelli più grossolani; le ghiaie, quando presenti, sono fini, e generalmente composte da litotipi derivanti dall'erosione di IMO (Sabbie gialle di Imola), a loro volta costituite da depositi sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi di ambiente costiero e subordinatamente da peliti di piana alluvionale o laguna (AMOROSI et alii, 1998a).

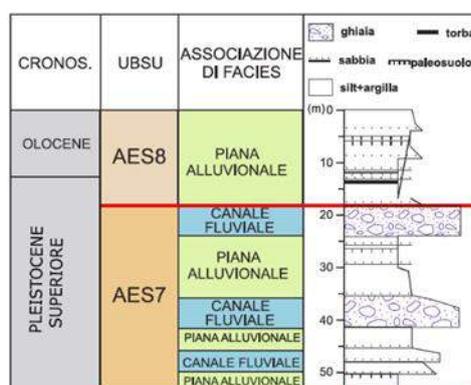


Figura 2.5: Porzione superiore stratigrafica del Supersintema Emiliano-Romagnolo relativa al sondaggio 221050-P515 (PROGETTO CARG, 2009).

L'AES è stato suddiviso in 8 Sub-Sintemi. I singoli Sub-Sintemi corrispondono a insiemi di terrazzi fluviali correlabili a più ordini, separati da ampie scarpate erosive e spesso caratterizzati da una diversa giacitura ed un differente grado di evoluzione pedogenetica.

Nello stralcio della carta geologica di Figura 2.6 è possibile osservare come l'area di studio sia caratterizzata dalla presenza del Sub-Sintemi AES 8 e di una sua sotto-unità AES8a, di seguito descritti.

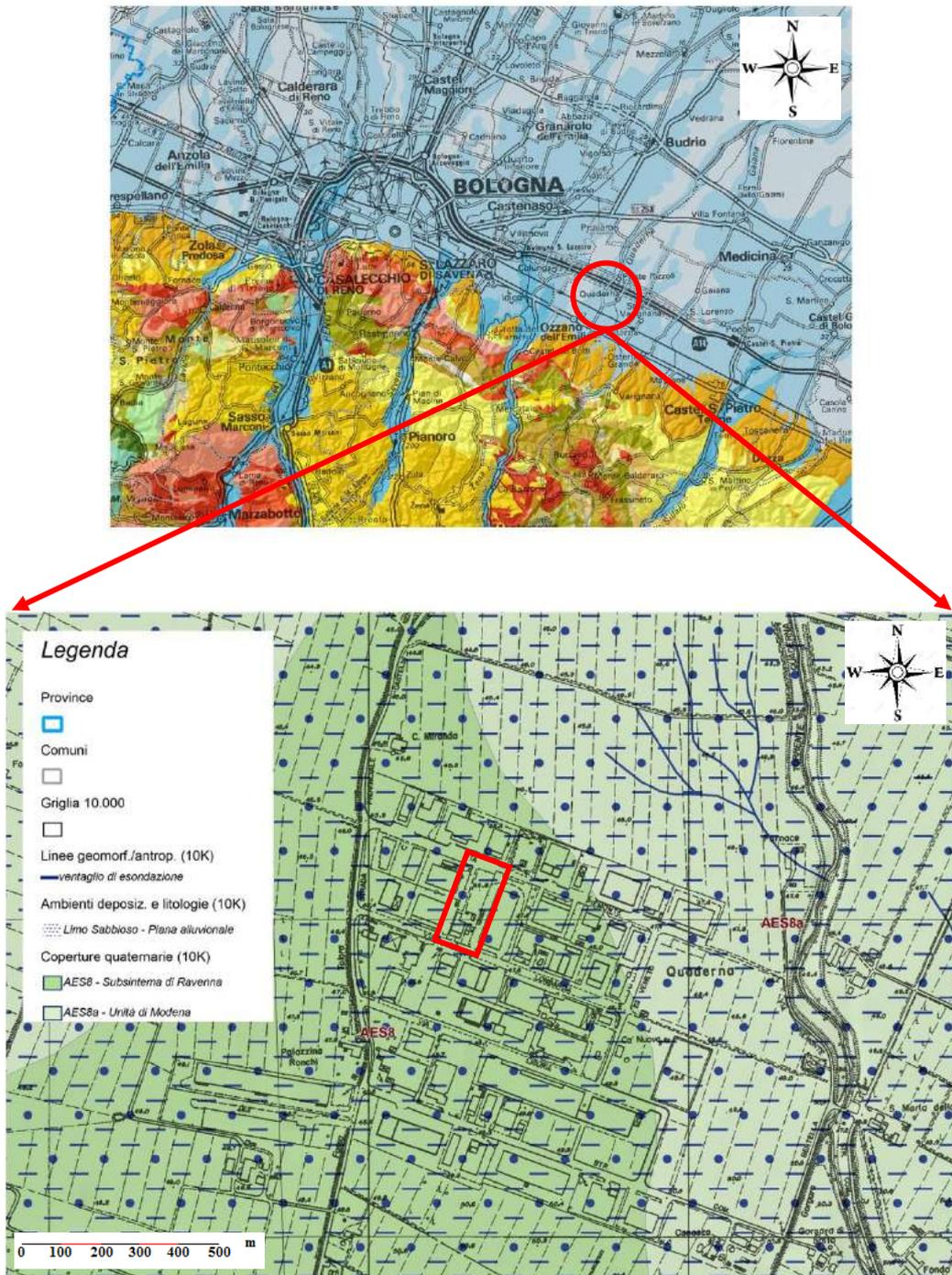


Figura 2.6: Inquadramento geologico di dettaglio dell'area oggetto di studio (PROGETTO CARG, 2009).

Il Sub-Sintema Ravenna (AES8) ha un'età corrispondente al Pleistocene superiore – Olocene (12ka – Attuale) ed è l'elemento sommitale del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore. Allo sbocco delle valli appenniniche e nei settori intravallivi il Substema di Ravenna è rappresentato da depositi di terrazzo fluviale, conoide alluvionale e piana alluvionale, in particolare ghiaie, sabbie, limi ed argille. Scarpate di pochi metri separano i singoli ordini di

terrazzo. Questi depositi sono generalmente costituiti da circa due metri di ghiaie, sovrastati da una copertura limoso-sabbiosa la cui porzione di alterazione pedogenetica può raggiungere circa un metro di spessore. Nelle posizioni più distali rispetto agli sbocchi delle valli appenniniche, AES8 affiora estesamente e la sua parte sommitale è costituita da depositi sabbioso-limosi di canale, argine e rotta fluviale, organizzati in corpi sedimentari a geometria prevalentemente nastriforme di spessore plurimetrico. I corpi ghiaiosi sono rari. Il tetto di AES8, che coincide col piano topografico, presenta suoli a diverso grado di evoluzione, con orizzonte superiore da calcareo a non calcareo. I suoli calcarei appartengono ad un'unità (Unità di Modena – AES8a) di rango inferiore a quello del subsistema e corrispondente alla parte sommitale del Subsistema di Ravenna.

L'Unità di Modena (AES8a) è datata nel suo limite inferiore al periodo post-romano. È costituita da sabbie, limi e argille (con ghiaie molto subordinate) di pianura alluvionale; trattandosi di depositi molto recenti è caratteristica la preservazione delle morfologie deposizionali originarie. In pianura corrisponde alla superficie di appoggio di depositi alluvionali al di sopra del suolo sviluppatosi in epoca romana. Il limite superiore dell'unità coincide col piano topografico (CREMASCHI & GASPERI, 1989). La deposizione di AES8a segna l'instaurarsi di un'importante fase di deterioramento climatico che, tra il IV e il VI secolo d.C., determinò un'importante incremento della piovosità, con conseguente modifica della rete idrografica e alluvionamento di gran parte della pianura (VEGGIANI, 1994).

### **2.3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO**

Gli acquiferi della pianura emiliano-romagnola sono costituiti principalmente dai depositi di origine alluvionale presenti nella porzione più superficiale della pianura, per uno spessore di circa 400-500 m e, in minima parte, da depositi marino-marginali. In R-ER & ENI-AGIP (1998) viene proposta una stratigrafia a livello di bacino per i depositi alluvionali e marino marginali presenti nelle prime centinaia di metri del sottosuolo padano. In questa pubblicazione vengono introdotte tre nuove unità idrostratigrafiche per la pianura emiliano-romagnola, denominate Gruppo Acquifero A, B e C:

- il Gruppo Acquifero A è il più recente ed ha un'età che va dall'Attuale sino a 350.000 450.000 anni ed è suddiviso in 5 complessi acquiferi (A0, A1, A2, A3, A4);
- il Gruppo Acquifero B, intermedio, va da 350.000 – 450.000 anni sino a 650.000 circa ed è suddiviso in 4 complessi acquiferi (B1, B2, B3, B4);
- il Gruppo Acquifero C è il più antico e va da 650.000 sino a oltre 3 milioni di anni ed è suddiviso in 5 complessi acquiferi (C1, C2, C3, C4, C5).

In Figura 2.7 è schematizzata l'architettura di tali gruppi acquiferi, lungo un generico transetto S-N, che va dalla zona pedeappenninica al fiume Po.

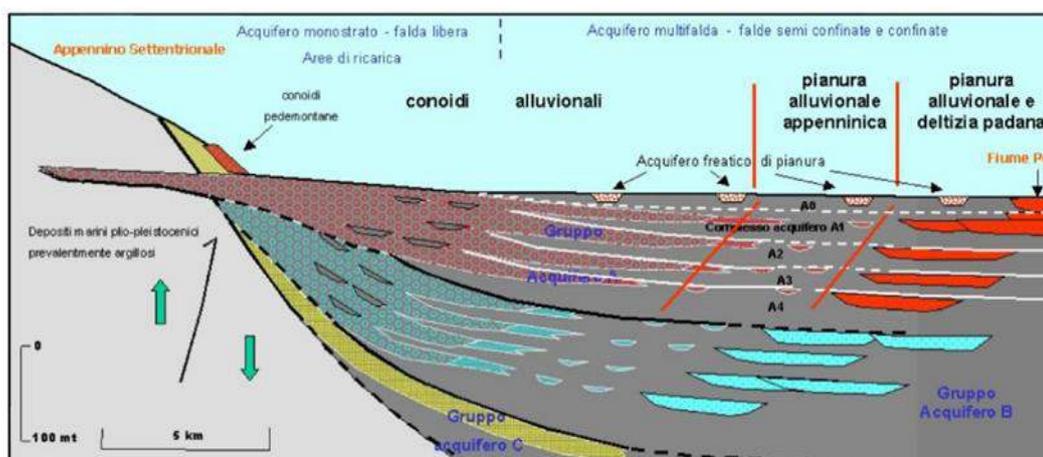


Figura 2.7: Schema spaziale rappresentativo dei corpi idrici significati (ARPA, 2009).

In Figura 2.3 sono riportate le relative correlazioni tra i gruppi acquiferi A, B, C con le unità utilizzate nella Carta Geologica d'Italia: i Gruppo acquiferi A e B sono costituiti principalmente da depositi alluvionali e sono correlabili rispettivamente con il Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) e il Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI). Il Gruppo acquifero C è formato principalmente da depositi costieri e corrisponde a diverse unità affioranti nell'Appennino, dove la più recente è rappresentata dalla Formazione delle Sabbie Gialle di Imola (AMOROSI *et al.*, 1998).

In Figura 2.7 viene riportata una sezione idrostratigrafica del sottosuolo dell'area di studio. È stata creata utilizzando il database dei sondaggi geognostici regionali, alcuni dei quali profondi diverse centinaia di metri (R-ER & ENI-AGIP., 1998).

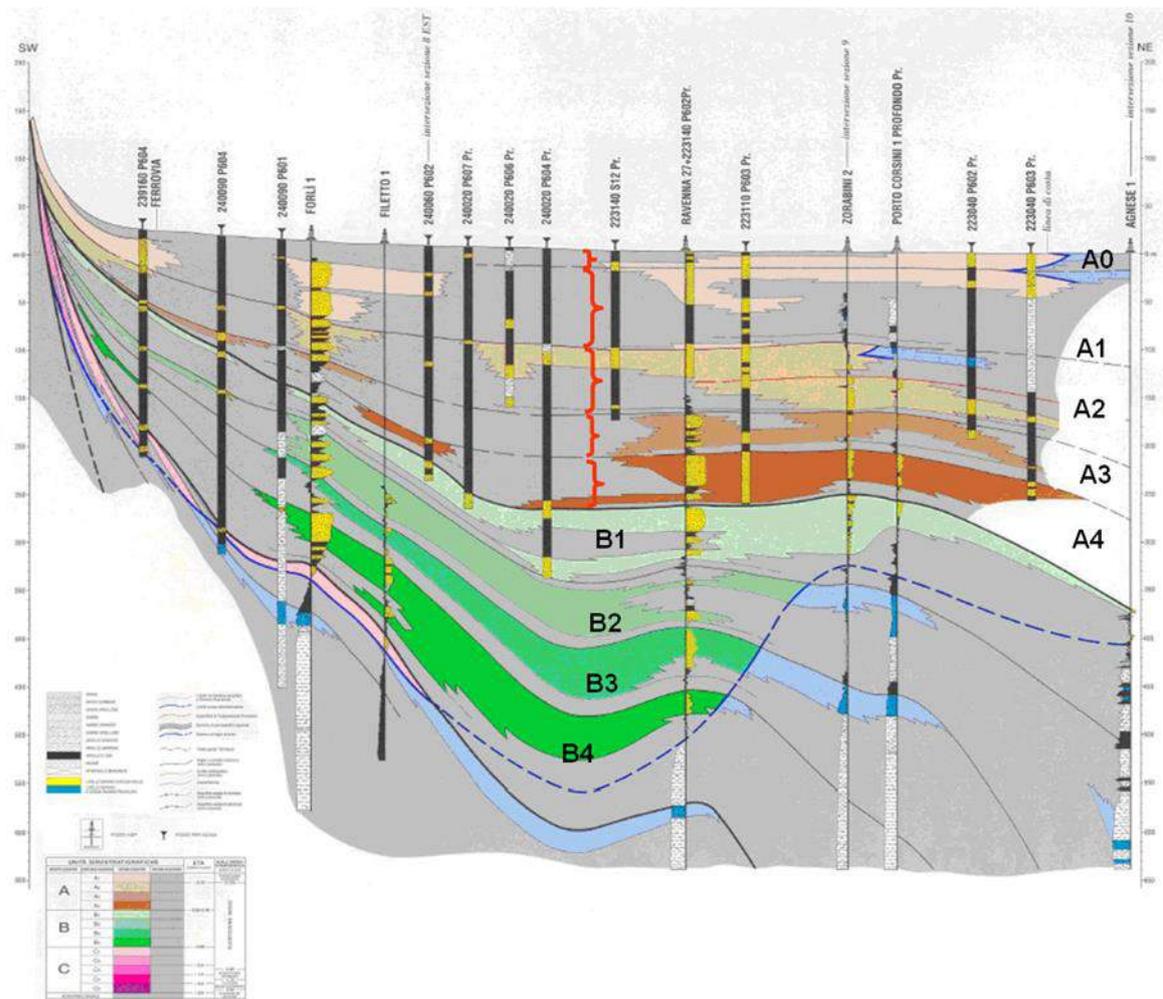


Figura 2.7: Sezione geologica dal margine appenninico forlivese fino alla costa romagnola (REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP, 1998; modificata)

Per quanto riguarda la ricarica degli acquiferi, si riconoscono tre principali meccanismi per il sistema multi-acquifero descritto: 1) ricarica diretta dal piano campagna dovuta a precipitazioni; 2) ricarica laterale dal fiume Po attraverso un canale attivo inciso per circa 15 m nella sequenza sedimentaria superficiale; 3) flusso di falda regionale profonda dai limiti della pianura padana lungo il margine padano appenninico, laddove i depositi macroclastici permeabili affiorano come conoidi alluvionali. Lungo la successione idrogeologica, dall'acquifero più superficiale al più profondo, il contributo della ricarica regionale aumenta (FILIPPINI *et al.*, 2015).

Il presente studio si concentra sull'acquifero più superficiale A0, di seguito descritto nel dettaglio.

### 2.3.1 Acquifero A0

In Figura 2.7 è possibile notare che, dove le ghiaie delle conoidi prossimali si approfondiscono sotto la pianura, è presente al di sopra di esse un livello di sedimenti prevalentemente fini che poi prosegue in tutta la pianura, ed è sede di una falda freatica di spessore molto variabile, fino a una decina di metri. Dal punto di vista stratigrafico questi sedimenti corrispondono all'unità AES8 della carta geologica, ed appartengono all'unità idrostratigrafica A0 (ISPRA, 2009). Lo spessore di quest'ultima può variare, arrivando a raggiungere nelle zone più subsidenti della pianura anche i 20 metri. La porzione inferiore di A0, può contenere acquiferi confinati di limitata estensione. La base di questi depositi è frequentemente costituita da un livello argilloso ricco di sostanza organica, mentre al di sopra di questo sono presenti sedimenti prevalentemente fini, caratterizzati da alternanze di sedimenti limosi, sabbiosi e argillosi in quantità variabili. Dal punto di vista deposizionale, questi sedimenti rappresentano depositi di canale fluviale, argine e piana inondabile. Nella porzione costiera questi depositi fanno transizione alle sabbie di spiaggia, con uno spessore che arriva ai 25 metri circa (ARPA, 2009).

A0 è caratterizzato da una superficie piezometrica prossima al piano campagna, il cui carico idraulico dipende sia dalle precipitazioni, che su questo corpo idrico costituiscono una parte rilevante della ricarica, sia dal rapporto con i corsi d'acqua superficiali, che possono in alcuni periodi dell'anno essere alimentanti, in altri drenanti, in funzione delle quote idrometriche relative e infine dipendere dal regime dei prelievi, che dalle aree d'infiltrazione rappresentate dai paleovalvei fluviali sabbiosi. Sulla base di studi isotopici (isotopi ambientali dell'idrogeno e dell'ossigeno), l'acquifero A0 è soprattutto ricaricato dalle precipitazioni locali, con un valore medio del 76% del totale della ricarica. Il resto della ricarica può essere fornita dai canali per l'irrigazione attivati durante la stagione estiva o per drenanza dai flussi verticali diretti verso l'alto dagli acquiferi sottostanti (FILIPPINI *et al.*, 2015).

Dal punto di vista idrogeologico l'acquifero freatico di pianura risulta essere di scarsa rilevanza per quel che riguarda il volume della risorsa, ma data la sua modesta profondità, esso è interessato da molti pozzi a grande diametro che vengono utilizzati per scopi principalmente domestici (FARINA *et al.*, 2014). L'importanza dell'acquifero freatico è strettamente collegata alla presenza dei corsi d'acqua superficiali e a tutti gli ecosistemi che dipendono da essi.

Nell'area di Bologna la direzione di flusso superficiale a scala regionale è SW-NE. (Figura 2.8). In Figura 2.9 viene mostrata la piezometria della conoide dell'Idice. Questa mostra come l'area di studio pur mantenendo una direzione del flusso SW-NE a scala regionale, venga influenzata da effetti antropici causando variazioni locali significative della direzione del flusso idrico.

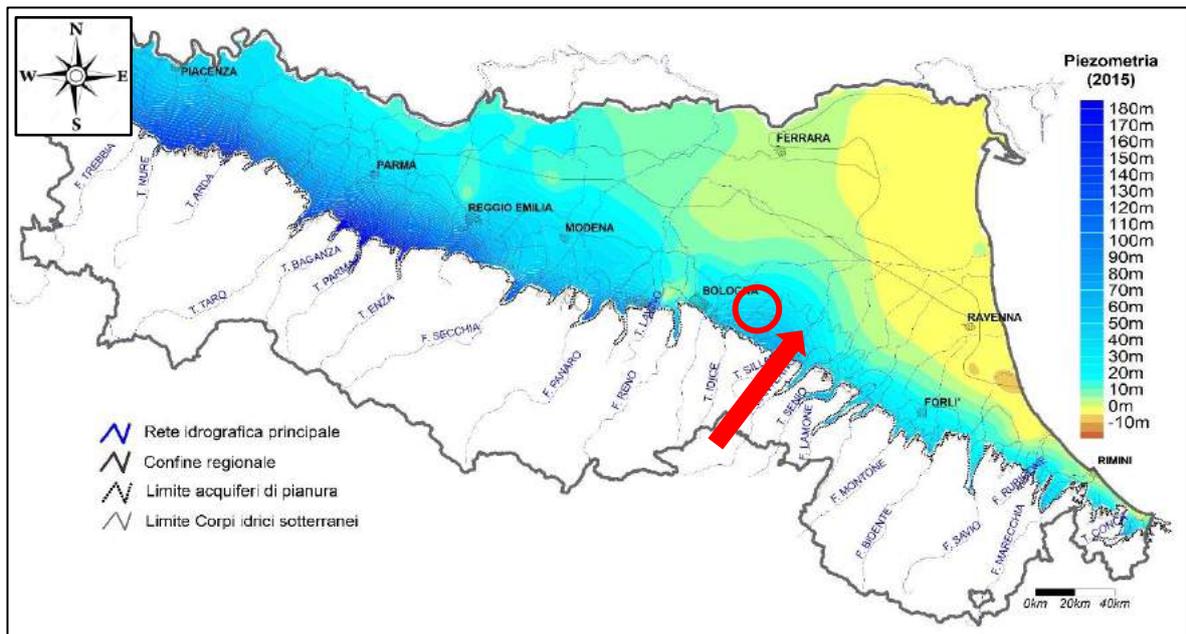


Figura 2.8: Piezometria media annua nei corpi idrici liberi e confinati superiori, il cerchio rosso indica l'area di studio, la freccia la direzione di flusso. (ARPAE, 2015).

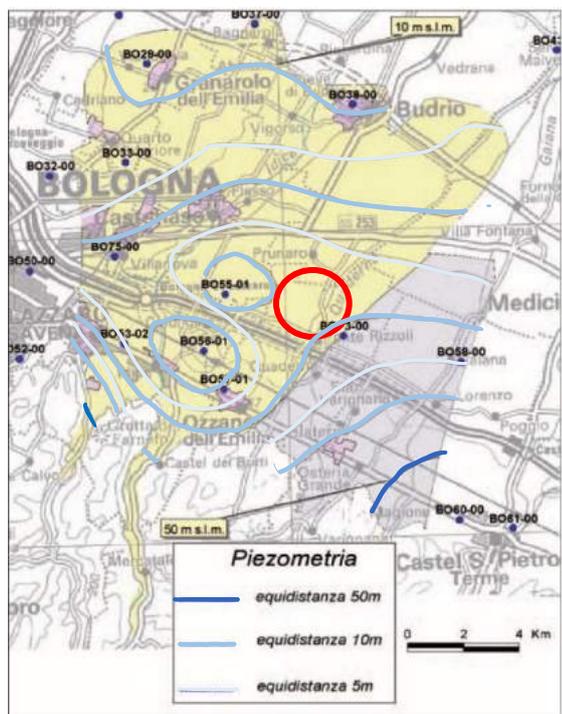


Figura 2.9: piezometria della conoide dell'Idice, il cerchio rosso indica l'area di studio. (ARPA, 2003, modificata).

## 2.4 CONTAMINAZIONE DA ORGANOCOLORURATI

Gli organoclorurati (comunemente chiamati anche solventi clorurati) sono dei composti di sintesi derivanti dagli idrocarburi alifatici, con l'aggiunta di un alogeno quale il cloro. Tali sostanze sono quindi costituite da atomi di carbonio, idrogeno e cloro.

Di seguito in Tabella 2.10 e in Figura 2.11 sono riportati i principali composti clorurati con le relative formule di struttura.

IUPAC Name	Common Name	Abbreviation/Acronym	Molecular Formula
<b>Chlorinated Methanes</b>			
tetrachloromethane	carbon tetrachloride	CT	CCl <sub>4</sub>
trichloromethane	chloroform	CF	CHCl <sub>3</sub>
dichloromethane	methylene chloride	DCM	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
chloromethane	methyl chloride	CM	CH <sub>3</sub> Cl
<b>Chlorinated Ethanes</b>			
hexachloroethane	perchloroethane	HCA	C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub>
pentachloroethane	---	PCA	C <sub>2</sub> HCl <sub>5</sub>
1,1,1,2-tetrachloroethane	---	1,1,1,2-TeCA	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>
1,1,2,2-tetrachloroethane	---	1,1,2,2-TeCA	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>
1,1,2-trichloroethane	---	1,1,2-TCA	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>
1,1,1-trichloroethane	methyl chloroform	1,1,1-TCA	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>
1,2-dichloroethane	---	1,2-DCA	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>
1,1-dichloroethane	---	1,1-DCA	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>
chloroethane	---	CA	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl
<b>Chlorinated Ethenes</b>			
tetrachloroethene	perchloroethene	PCE	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>
trichloroethene	---	TCE	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>
<i>cis</i> -1,2-dichloroethene	<i>cis</i> -dichloroethene	<i>cis</i> -DCE	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
<i>trans</i> -1,2-dichloroethene	<i>trans</i> -dichloroethene	<i>trans</i> -DCE	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
1,1-dichloroethene	vinylidene chloride	1,1-DCE	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
chloroethene	vinyl chloride	VC	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl

Tabella 2.10: nomenclatura e formule molecolari di alcuni solventi clorurati (HANS F. STROO & C. HERBWARD, 2010).

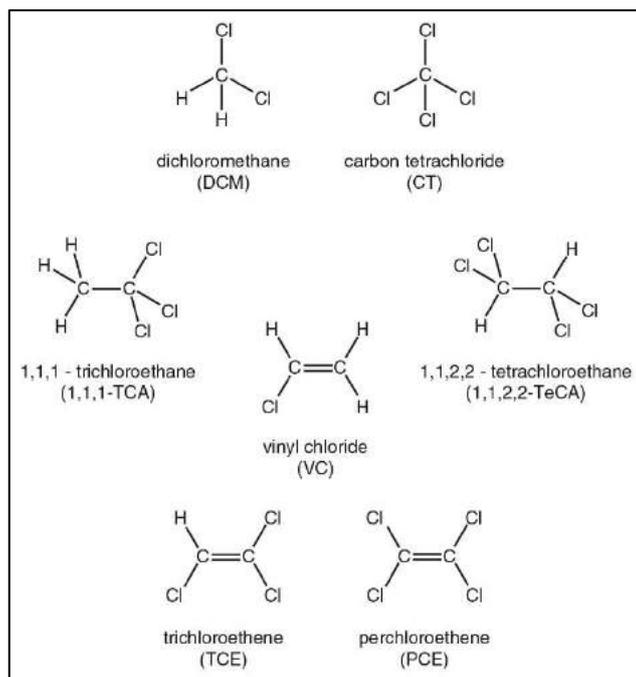


Figura 2.11: formule di struttura di alcuni solventi clorurati (CWIERTNY & SCHERER, 2010)

I solventi clorurati sono tra le sostanze più utilizzate dalla chimica moderna e vengono utilizzati in campo civile e industriale. Una larga diffusione iniziata nell'immediato dopoguerra ha causato un notevole accumulo nell'ambiente compromettendone la qualità. Questi solventi sono considerati altamente pericolosi, non vanno immessi nell'ambiente e pertanto richiedono un adeguato trattamento. Il limite nazionale sulla presenza di tali composti nelle acque sotterranee come sommatoria, definito dal D.Lgs. 152/99, è pari a 10 µg/l, coincidente con il limite per le acque potabili (D.Lgs. 31/01).

Contaminazioni da organoclorurati sono rinvenute di frequente nelle acque sotterranee della pianura emiliano-romagnola (così come in molte altre parti del pianeta), e sono prevalentemente di origine industriale (HANS F. STROO *et al.*, 2010).

Una severa contaminazione da organoclorurati è stata rinvenuta anche nell'area oggetto di studio del presente lavoro (ex stabilimento Ot-Gal), entro l'acquifero superficiale A0.

Verranno di seguito descritte le caratteristiche principali di tale tipologia di contaminazione e le principali dinamiche di migrazione e degradazione tali contaminanti in un sistema acquifero.

#### **2.4.1 Non Aqueous Phase Liquid (NAPL) e partizione multifase**

I solventi clorurati sono spesso dispersi nell'ambiente sotto forma di liquido in fase non acquosa (nota come fase pura o *NAPL - Non Aqueous Phase Liquid*).

La fase NAPL si suddivide in due tipologie: LNAPL (light NAPL) più leggera dell'acqua (generalmente composta di una miscela di idrocarburi del petrolio), e DNAPL (dense NAPL) più densa dell'acqua (generalmente composta di una miscela di organoclorurati, di interesse nel presente studio). Gli LNAPL tendono a "galleggiare" al di sopra della tavola d'acqua ed a scorrere sulla superficie della falda seguendo il gradiente idraulico (Figura 2.12). La fase DNAPL, diversamente, tende a scendere verso il basso nel sistema in maniera totale e diretta (in virtù dell'elevata densità ma anche di una minore viscosità rispetto all'acqua), fino a che non trova una resistenza altamente impermeabile. A tale profondità, il DNAPL tende ad accumularsi formando un *pool* (Figura 2.12). Il *pool* di DNAPL tende poi a migrare seguendo il gradiente topografico del substrato (che non coincide necessariamente con il gradiente idraulico). Pertanto, in alcuni casi è possibile trovare DNAPL anche a monte idrogeologico rispetto alla sua sorgente (PANKOW JF & CHERRY JA, 1996).

La fase NAPL (DNAPL, nel caso degli organoclorurati) può poi essere soggetta a partizione multifase tale per cui i contaminanti possono passare in soluzione acquosa, in fase gassosa e/o adsorbiti sulla matrice solida:

-Il parametro che quantifica la tendenza dell'inquinante a disciogliersi in acqua è la solubilità (generalmente espressa in mg/l e in funzione della temperatura). Il passaggio in soluzione acquosa degli organoclorurati produce un *plume* di contaminanti disciolti che migra in maniera solidale al flusso di falda.

-Il parametro che quantifica il passaggio dalla fase liquida alla fase di vapore è la Costante di Henry (H). La partizione alla fase gassosa può avvenire solamente al contatto tra la zona satura e la zona non satura, con il conseguente accumulo di contaminanti in fase gassosa nei pori insaturi.

-La partizione alla fase solida è descritta dal coefficiente di partizione ( $K_d$ ) che determina la tendenza del composto ad attaccarsi alla matrice solida.  $K_d$  può essere determinato come il prodotto tra il coefficiente di partizione carbonio organico-acqua ( $K_{oc}$ ) e la frazione di carbonio organico presente nella matrice solida ( $f_{oc}$ ).

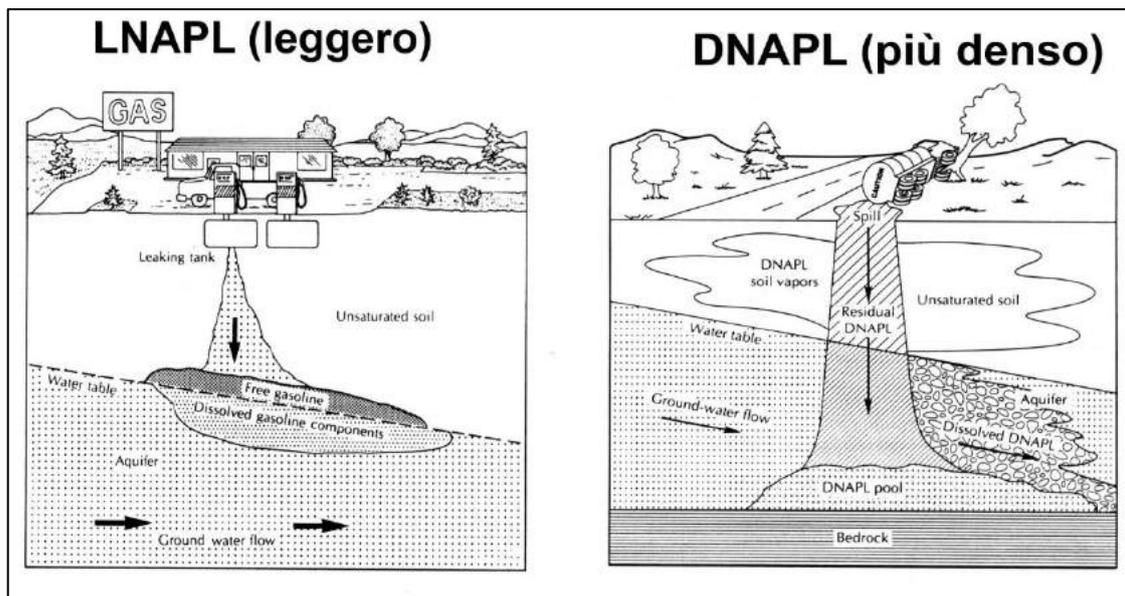


Figura 2.12: dinamiche di migrazione e partizione di NAPL in un sistema acquifero, a seguito di uno sversamento superficiale (FETTER, C.W. ,1999).

I solventi clorurati presentano differenti proprietà che influenzano la loro diffusione e il loro trasporto in ambiente, in particolare nella zona satura e insatura. Di seguito alcune principali caratteristiche dei solventi clorurati:

- Il comportamento fisico-chimico dei solventi clorurati è altamente influenzato dalla presenza di atomi di cloro. All'aumentare degli atomi di cloro presenti, il peso molecolare e la densità genericamente aumentano, mentre la tensione di vapore e la solubilità in acqua diminuiscono;
- Il cloroetano (CA) e il cloruro di vinile (VC) sono gassosi a temperatura e pressione ambiente, mentre tutti gli altri composti sono più densi dell'acqua. La densità varia tra un minimo di 1.17 g/mL (1.1. dicloroetano - 1.1 DCA) e un massimo di 2.09 g/mL (esacloroetano - HCA), ciò comporta tutte le difficoltà nel trattamento e bonifica degli DNAPL;
- la solubilità in acqua presenta valori compresi tra 50 mg/L (HCA) e 13.2 g/L diclorometano (DCM). Tricloroetilene (TCE) e 1.1 dicloroetilene (1.1-DCE) sono l'oggetto del presente studio e presentano valori di solubilità rispettivamente pari a 1.1 g/L e 3.34 g/L. Secondo il D.M. 152/2006 le concentrazioni soglia di contaminazione (CSC) sono 1.5 µg/L per il TCE e 0.05 µg/L per l'1.1-DCE, ben sei ordini di grandezza inferiori rispetto alla solubilità;
- La tensione di vapore definisce la ripartizione del contaminante tra la fase di liquido puro o la fase adsorbita nel terreno e la fase gas presente nel sottosuolo. L'1.1 DCE e TCE presentano rispettivamente valori pari a 604 torr e 74.2 torr (1 torr = 1 mmHg).

In Tabella 2.13 è riportato un elenco di alcune proprietà fisico chimiche degli idrocarburi clorurati. Tutti i parametri sono considerati ad una temperatura di 25 °C.

Species	Formula Weight (g/mol)	Carbon Oxidation State <sup>a</sup>	Density ( $\rho$ ) (g/mL)	Solubility (S) (mg/L)	Vapor Pressure ( $p^\circ$ ) (torr)	Henry's Law Constant ( $K_H$ ) ( $\times 10^{-3}$ atm·m <sup>3</sup> /mol)	Log ( $K_{ow}$ )	Log ( $K_{oc}$ ) <sup>b</sup>	MCL <sup>c</sup> (mg/L)
<b>Chlorinated Methanes</b>									
CT	153.8	+IV	1.59	800	153.8	28.9	2.64	1.9	0.005
CF	119.4	+III	1.49	8,200	196.8	3.8	1.97	1.52	0.10 <sup>d</sup>
DCM	84.9	+II	1.33	13,200	415	1.7	1.25	—	0.005
CM	50.5	+I	0.92	5,235	4,275	9.6	0.91	—	NR <sup>e</sup>
<b>Chlorinated Ethanes</b>									
HCA	236.7	+III	2.09	50	0.38 <sup>f</sup>	—	3.93	—	NR
PCA	202.3	+II	1.68	500	4.7	2.5	2.89	—	NR
1122-TeCA	167.9	+I	1.60	2,962	5.9	0.44	2.39	1.9	NR
1112-TeCA	167.9	+I	1.54	1,100	11.9	2.4	—	—	NR
111-TCA	133.4	0	1.35	1,495	123.8	14.5	2.49	2.25	0.2
112-TCA	133.4	0	1.44	4,394	24.2	0.96	2.38	—	0.005
12-DCA	99.0	-I	1.25	8,606	79.0	1.2	1.48	1.52	0.005
11-DCA	99.0	-I	1.17	4,676	227	6.2	1.79	—	NR
CA	64.5	-II	0.90	5,700	120	1.8	1.43	—	NR
<b>Chlorinated Ethenes</b>									
PCE	165.8	+II	1.63	150	18.1	26.3	2.88	2.29	0.005
TCE	131.4	+I	1.46	1,100	74.2	11.7	2.53	1.53	0.005
<i>cis</i> -DCE	96.9	0	1.28	3,500	203	7.4	1.86	—	0.07
<i>trans</i> -DCE	96.9	0	1.26	6,260	333	6.8	1.93	—	0.1
11-DCE	96.9	0	1.22	3,344	604	23.0	2.13	—	0.007
VC	62.5	-I	0.91	2,763	2,660	79.2	1.38	—	0.002

<sup>a</sup>Average value calculated using oxidation states for H = +I and Cl = -I.  
<sup>b</sup>When available, log( $K_{oc}$ ) values were obtained from Nguyen et al. (2005).  
<sup>c</sup>Source: USEPA (2003).  
<sup>d</sup>MCL for total trihalomethanes, which is defined as the summed concentration of chloroform, bromoform (CHBr<sub>3</sub>), bromodichloromethane (CHBrCl<sub>2</sub>), and dibromochloromethane (CHBr<sub>2</sub>Cl).  
<sup>e</sup>NR = Not regulated.  
<sup>f</sup>Reported vapor pressure for solid-phase hexachloroethane.  
Notes: atm – atmosphere; g – gram;  $K_{ow}$  – octanol/water partitioning coefficient;  $K_{oc}$  – soil organic carbon/water partitioning coefficient; L – liter; MCL – maximum contaminant level; mg – milligram; mL – milliliter; mol – mole.

Tabella 2.13: proprietà di alcuni solventi clorurati (HANS F. STROO & C. HERB WARD, 2010)

#### 2.4.2 Meccanismi di degradazione degli organoclorurati

I meccanismi di degradazione dei solventi clorurati sono essenzialmente due: degradazione abiotica (in assenza di microrganismi) e degradazione biotica (mediata da processi biologici). Le reazioni abiotiche avvengono in acqua attraverso due particolari processi: sostituzione ed eliminazione. Nelle reazioni di sostituzione il cloro viene rimpiazzato con un altro sostituente (es. idrolisi, con formazione di un alcol), mentre in quelle di eliminazione, un atomo di cloro e di idrogeno legati a due atomi di carbonio adiacenti vengono eliminati con la conseguente formazione di doppi legami (es. deidroalogenazione, che produce trasformazione di alcani in alcheni). Le reazioni biotiche possono essere di ossidazione o di riduzione (HANS F. STROO & C. HERB WARD, 2010). A titolo di esempio, in Figura 2.14 viene mostrato un processo di declorazione riduttiva, che rappresenta il principale processo di degradazione degli organoclorurati in un sistema acquifero riducente. VC e DCE sono

spesso i prodotti finali dell'incompleta dechlorazione del PCE, dove il VC è più tossico del PCE di partenza.

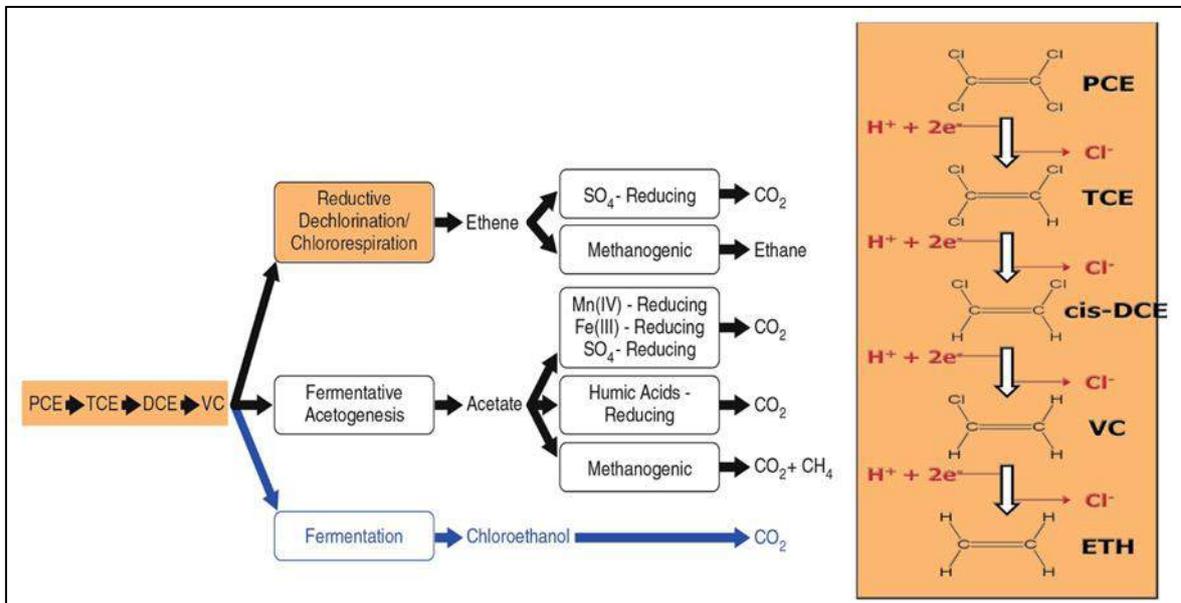


Figura 2.14: Alcuni processi di degradazione dei solventi clorurati. In particolare, la sequenza PCE-TCE-DCE-VC è il risultato di una dechlorazione riduttiva (BRADLEY, 2003, modificata)

### 2.4.3 Campi di utilizzo degli organoclorurati

I solventi clorurati presentano una larga diffusione e sono utilizzati principalmente in ambito industriale. Quelli più utilizzati sono il cloroformio (CF), il tetracloruro di carbonio (CT), il tricloroetilene (TCE), il percloroetilene (PCE) e il cloruro di metilene (MC).

- *Il cloroformio (CF)*: attualmente utilizzato principalmente per la produzione di freon-R22 un liquido refrigerante, estrazione e purificazione di farmaci, stadio intermedio nella produzione di coloranti e pesticidi;
- *Il tetracloruro di carbonio (CT)*: utilizzato principalmente come solvente;
- *Il tricloroetilene (TCE)*: Noto col nome commerciale di trielina, viene usato per l'estrazione di oli vegetali in piante esotiche (cocco e palma), per pulire (sgrassatura) parti metalliche, nella produzione di adesivi e di sostituti ai CFC (clorofluorocarburi), ma anche come solvente nel lavaggio a secco nelle industrie tessili;
- *Il percloroetilene (PCE)*: applicazioni simili al TCE, sgrassatura di parti metalliche, lavaggio a secco, produzione di sostituti dei CFC (clorofluorocarburi), lavorazioni nel settore tessile;
- *Il cloruro di metilene (MC)*: estrazioni nel settore alimentare, trattamenti delle superfici, produzione di componenti dell'industria elettronica, prodotti farmaceutici e aerosol.

## 2.5 PUMP & TREAT

Il *Pump and Treat* è una tecnica di bonifica che consiste nel pompaggio e trattamento in superficie delle acque di falda inquinata. Il processo prevede la creazione di un gradiente idraulico attorno ai punti di emungimento, prodotto dal pompaggio di acqua dalla falda, ed il successivo trattamento in superficie delle acque estratte (tecnologia *on-site*) (MACKAY & CHERRY, 1989)

Il processo di bonifica avviene (solitamente) secondo le seguenti fasi:

- emungimento dell'acqua inquinata dai pozzi di estrazione per mezzo di pompe. Il numero di pozzi impiegati dipende dall'estensione dell'area da bonificare e dal tipo di sorgente contaminante;
- raccolta dell'acqua in serbatoi di stoccaggio e trattamento;
- depurazione dell'acqua inquinata e reinserimento della stessa nella falda o eventuale scarico in fognatura.

L'acqua di falda contaminata è dunque estratta dal sottosuolo attraverso un opportuno sistema di pozzi che, oltre a trattare l'acqua contaminata estratta (es. con materiali adsorbenti), opera anche un immediato effetto di contenimento alla migrazione verso valle della contaminazione. La tecnica, inoltre, permette di raggiungere falde contaminate anche a notevole profondità. I contaminanti pompati dalla falda sono inviati al trattamento ed a seconda della tipologia di contaminante viene selezionato il substrato di filtrazione o la tecnologia di post trattamento più adeguato. In Figura 2.15 vengono mostrati alcuni esempi di contenimento idraulico (COHEN *et al.*, 1997). In Figura 2.15a è mostrata una depressione piezometrica prodotta da un singolo pozzo di estrazione, al fine di produrre un richiamo di acqua inquinata dentro la zona di influenza e quindi una rottura del *plume* nella sua porzione più di valle. Soluzioni alternative prevedono la realizzazione di trincee orizzontali (Figura 2.15b) o di più pozzi di emungimento, magari accoppiati a diaframmi impermeabili (Figura 2.15c), che costituiscono nel complesso una barriera idraulica (CERBINI E GORLA, 2009).

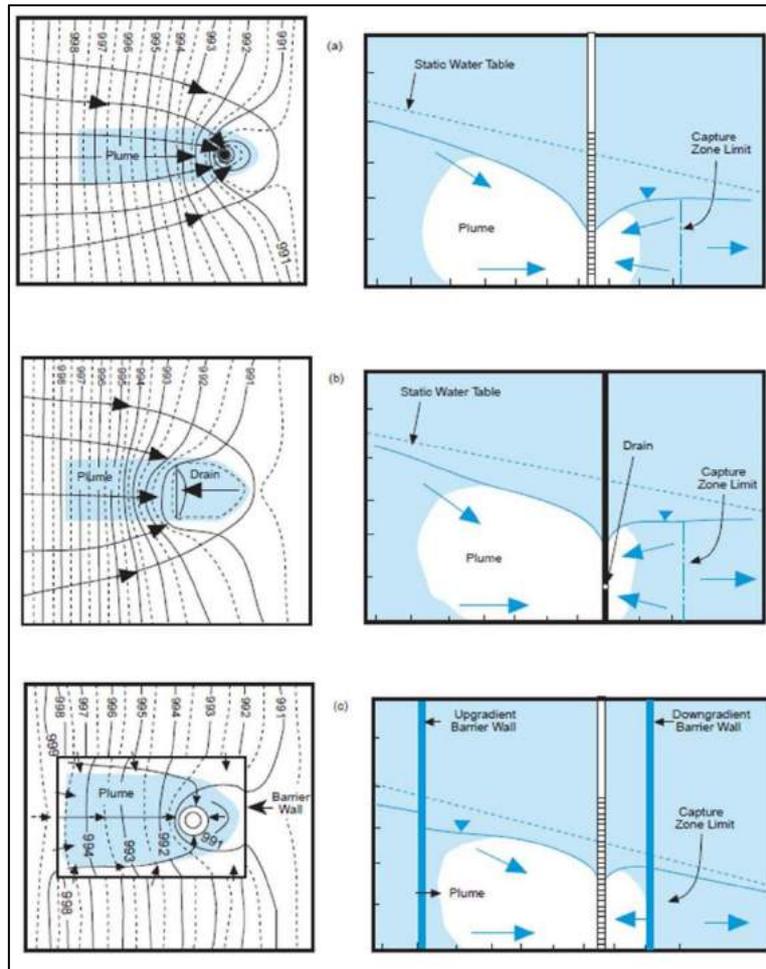


Figura 2.15: Esempi di contenimento idraulico, in pianta e in sezione, rispettivamente con pozzo di prelievo verticale a), dreno orizzontale b) e sistema combinato pozzo + barriera impermeabile c) (COHEN et al., 1997).

### 2.5.1 Materiali adsorbenti

In un impianto di bonifica di tipo *Pump&Treat* il trattamento dell'acqua inquinata può essere eseguito in sito attraverso l'utilizzo di materiali altamente adsorbenti. Ogni tipologia di inquinante presenta delle caratteristiche differenti che rendono più o meno efficace l'utilizzo di un materiale adsorbente piuttosto che un altro. Di seguito sono descritti due tra i materiali più utilizzati:

#### Zeoliti

Nella classe mineralogica dei silicati, unitamente ai feldspati, feldspatoidi e minerali della silice, le zeoliti costituiscono la sottoclasse dei tetrosilicati dove le unità strutturali tipiche di tutti i silicati tetraedri  $(SiO_4)^{4-}$ , sono unite fra loro mediante condivisione dei quattro ossigeni apicali dando origine ad una impalcatura tetraedrica tridimensionale estesa teoricamente all'infinito. Poiché l'angolo T-O-T è di circa  $135^\circ$ , le strutture di tutti i tetrosilicati sono

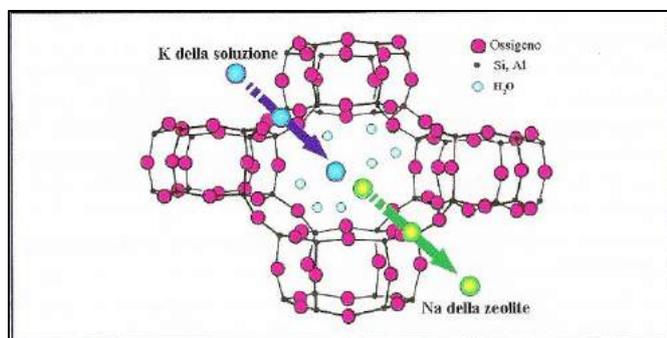
“aperte” e come tali contengono cavità di dimensioni nettamente superiori alle massime (ottaedriche) compatibili con le strutture compatte (GOTTARDI, 1978).

In virtù della struttura cristallina e composizione chimica, le zeoliti godono delle seguenti peculiari proprietà chimico-fisiche:

1. disidratazione reversibile;
2. elevata e selettiva capacità di adsorbimento molecolare;
3. comportamento catalitico;

elevata e selettiva capacità di scambio cationico (Figura 2.16);

Minerale	CSC (meq/g)
Mordenite	1.8 – 2.0
Clinoptilolite	2.0 – 2.3
Chabasite	3.0 – 3.5
Phillipsite	3.0 – 3.5
Analcime	4.0 – 4.5
Sepiolite	0.3 – 0.4
Montmorillonite	0.8 – 1.0



**Figura 2.16:** Capacità di scambio cationico (CSC in meq/g) di alcune zeoliti (analcime, mordenite, clinoptilolite, chabasite, phillipsite) e fillosilicati (sepiolite, montmorillonite). A destra illustrazione schematica della dinamica dello scambio cationico (PASSAGLIA et al., 1995B).

Le zeoliti presentano varie applicazioni in edilizia come materiali da costruzione e come isolanti termici, nella separazione, purificazione e disidratazione di gas naturali, in agricoltura e floricoltura, ma soprattutto trovano abbondante impiego nella depurazione di reflui civili, zootecnici e industriali. Numerosi studi dimostrano come l’utilizzo delle zeoliti (principalmente chabasite e phillipsite) nella depurazione delle acque di scarico urbano, del percolato da discarica di rifiuti solidi urbani, di reflui dell’industria di detersivi, di macellazione, ittica e suinicola, risulti particolarmente efficace per la rimozione di ammoniaca ( $\text{NH}_3$ ) e ioni ammonio ( $\text{NH}_4^+$ ), (PASSAGLIA, 2008).

### Carboni attivi

I carboni attivi (Figura 2.17) impiegati normalmente per il trattamento di acque potabili, acque reflue e gas sono preparati a partire da diversi tipi di materiale, come ad esempio carbone minerale, torba, legno o lignite. Questi materiali sono gli adsorbenti conosciuti da più tempo, il carbone viene utilizzato come materiale filtrante nella fase finale di

purificazione dell'acqua. Le proprietà finali di un carbone attivo dipendono significativamente dalla natura del materiale di partenza. La preparazione di un carbone consiste nella pirolisi del materiale base, seguita da una fase di ossidazione. La prima fase consiste nel sottoporre il materiale a temperature variabili tra 600 e 900 °C in assenza di aria.

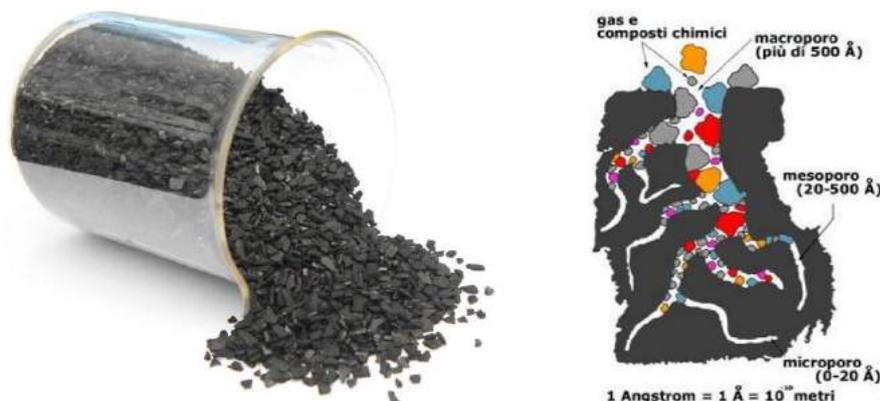


Figura 2.17: a destra un esempio di struttura interna di carbone attivo, a sinistra come si presentano i GAC (carboni attivi granulari).

L'aggiunta di cloruri di metallo favorisce lo sviluppo di pori. La successiva fase di ossidazione, la cui funzione è quella di "attivare" il carbone, è di solito effettuata utilizzando vapore, sebbene aria (meno frequentemente CO<sub>2</sub>) qualche volta è scelta, a temperature variabili tra 600 e 900 °C. Durante questa fase, i gas ossidanti erodono la superficie del carbone, sviluppando una vasta rete interna di pori. Il tempo totale di attivazione è molto importante, perché gioca un ruolo fondamentale nella formazione dei pori. È comunque importante sottolineare che all'aumentare del tempo di attivazione non solo aumenta la quantità di pori, ma anche la loro grandezza (ciò implica la riduzione dell'area superficiale interna), con il conseguente aumento nell'adsorbimento di molecole ad elevato peso molecolare. I carboni attivi sono caratterizzati dalle seguenti proprietà fisiche: il contenuto di ceneri, l'umidità, la resistenza all'abrasione, la densità (apparente, particellare e reale), le dimensioni dei pori, l'area superficiale. Tutte queste proprietà giocano un ruolo fondamentale sulla capacità di adsorbimento del materiale adsorbente (COONEY, 1999). Il carbone attivo esiste in due varianti: Carbone Attivo in Polvere (PAC) e Carbone Attivo Granulare (GAC). La versione GAC è usata principalmente nel trattamento delle acque, può adsorbire le seguenti sostanze solubili:

- sostanze organiche non polari come Oli minerali, BTEX, idrocarburi alifatici, Idrocarburi poliaromatici (PACs), Fenocloridi
- sostanze alogenate: I, Br, Cl, H e F
- odori, sapore, lieviti, vari prodotti di fermentazione

La rigenerazione permette di ripristinare le capacità adsorbenti del carbone e può essere effettuata mediante (Cooney, 1999):

- metodo chimico, che prevede l'utilizzo di reattivi chimici per l'ossidazione delle sostanze organiche adsorbite o la loro estrazione con solventi;
- flusso di vapore o di gas inerte a temperature relativamente alte per l'allontanamento delle sostanze volatili adsorbite;
- processi di rigenerazione biologica;
- processi termici, attuati attraverso il riscaldamento del materiale in forni rotanti ad atmosfera controllata fino a temperature di 800-900 °C.

## **2.6 IMPIANTI GEOTERMICI A BASSA ENTALPIA**

La geotermia è una risorsa energetica rinnovabile di grande interesse. Con l'impegno preso dalla maggior parte delle nazioni mondiali all'interno del protocollo di Kyoto, risulta sicuramente molto importante promuovere lo sviluppo di tecnologie ecosostenibile e/o a basso impatto ambientale sia a scala nazionale, ma soprattutto a scala regionale. Il calore terrestre è un'energia non solo rinnovabile, ma anche praticamente inesauribile in quanto prodotta dall'energia termica rilasciata in processi di decadimento radioattivo di elementi contenuti naturalmente nelle profondità della terra (ARPA, 2011). Lo sfruttamento geotermico di solito è concentrato in corrispondenza di punti caldi chiamati *Hotspot* come aree vulcaniche, geysers, sorgenti termali, tutti luoghi che presentano condizioni geologiche particolari, tali da permettere la risalita spontanea di fluidi e vapori caldi dalla profondità della terra sino alla superficie, rendendo così disponibile un calore inesauribile. Questi luoghi pur presentando un potenziale geotermico elevato da tale permettere sistemi ad alta entalpia, risultano isolati territorialmente e pertanto non sfruttabili in qualsiasi area geografica. Il D.Lgs n.22 del 11 febbraio 2010 classifica tre tipologie di geotermia:

- risorse geotermiche ad alta entalpia (con temperature del fluido > 150 °C) di interesse nazionale se usate con impianti superiori di 20 MW;
- risorse geotermiche a media entalpia (con temperature del fluido comprese tra 150 °C e 90 °C) di interesse locale se utilizzati con impianti inferiori a 20 MW;
- risorse geotermiche a bassa entalpia (con temperature del fluido < di 90°C) di interesse locale se utilizzati con impianti inferiori a 20 MW;

La geotermia a bassa entalpia si propone di sfruttare le proprietà fisiche del sottosuolo ove non è naturalmente presente acqua calda > di 90° C. Questo sfruttamento può essere utilizzato per il funzionamento di pompe di calore per la climatizzazione di ambienti civili e produttivi, in particolare per il riscaldamento, per il raffrescamento e per la produzione acqua calda sanitaria (ACS). La temperatura del sottosuolo, già a partire da pochi metri di profondità, si mantiene costante in quanto non è influenzata dalle variazioni quotidiane e stagionali che si verificano in ambiente esterno. In base alla metodologia di sfruttamento della sorgente geotermica a bassa entalpia, possono distinguersi le seguenti grandi tipologie di scambiatori geotermici, facenti parte dell'impianto:

1. Scambiatori a ciclo chiuso (*closed-loop*);
2. Scambiatori a ciclo aperto (*open-loop*)

Negli impianti a ciclo chiuso vengono utilizzate delle sonde geotermiche, tubi fissi nel terreno nei quali viene fatto circolare un fluido che col terreno scambia calore, quindi non vi è nessuno scambio di materia tra lo scambiatore geotermico e il circuito in cui circola il fluido termovettore destinato al funzionamento dell'impianto. Nei sistemi *open-loop* il fluido termovettore è rappresentato dall'acqua di falda. Lo scambio termico (l'unico scambio che avviene) tra scambiatore di calore e sottosuolo, avviene attraverso i conosciuti meccanismi di trasmissione del calore:

- la conduzione termica;
- la convezione termica.

La conduzione termica avviene tra il tubo scambiatore e il terreno (asciutto, umido o saturo) e/o l'acqua di falda. La convezione termica avviene solo a livello del fluido presente nel sottosuolo, ovvero l'acqua di falda. Più la falda è presente, e in movimento lungo lo scambiatore, migliore sarà lo scambio termico (FROLDI, 2013). Con un sistema *open-loop* è possibile ottenere una sorgente di calore consistente, con un costo basso. Quando possibile si preferisce realizzare questi impianti piuttosto che impianti a terreno chiamati *closed-loop*. (BASTA & MINCHIO, 2008).

### 2.6.1 Impianti geotermici *open-loop*

L'architettura dei sistemi geotermici a ciclo aperto (Figura 2.18), non si discosta sensibilmente da quelli a ciclo chiuso, salvo che per la sezione di scambio geotermico. In questi sistemi, detti anche di presa-resa, si realizza un pozzo di estrazione e un pozzo di immissione (che può essere sostituito da un corpo idrico superficiale), da cui rispettivamente prelevare e immettere calore. In essi le sezioni principali sono le seguenti (FROLDI, 2013):

1. **Pozzo di presa (o di estrazione)** in cui viene estratta l'acqua di falda a mezzo di una pompa sommersa da pozzo a singolo stadio, multistadio o con funzionamento ad inverter;
2. **Pozzo o corpo idrico di resa (o di iniezione) superficiale**, es: falda, lago, canale, fiume, fognatura, ecc., in cui viene immessa l'acqua estratta ad una temperatura differente (inferiore in fase di riscaldamento e superiore in fase di raffreddamento) da quella di estrazione;
3. **Pompa di calore (PdC)**: è una macchina termica che permette di "pompate" il calore da un livello termico più basso ad uno più alto. Sono quattro i principali componenti che costituiscono una PdC: evaporatore, compressore, condensatore e valvola di laminazione (BASTA & MINCHIO, 2008). Il funzionamento di una PdC verrà descritto nel paragrafo successivo.

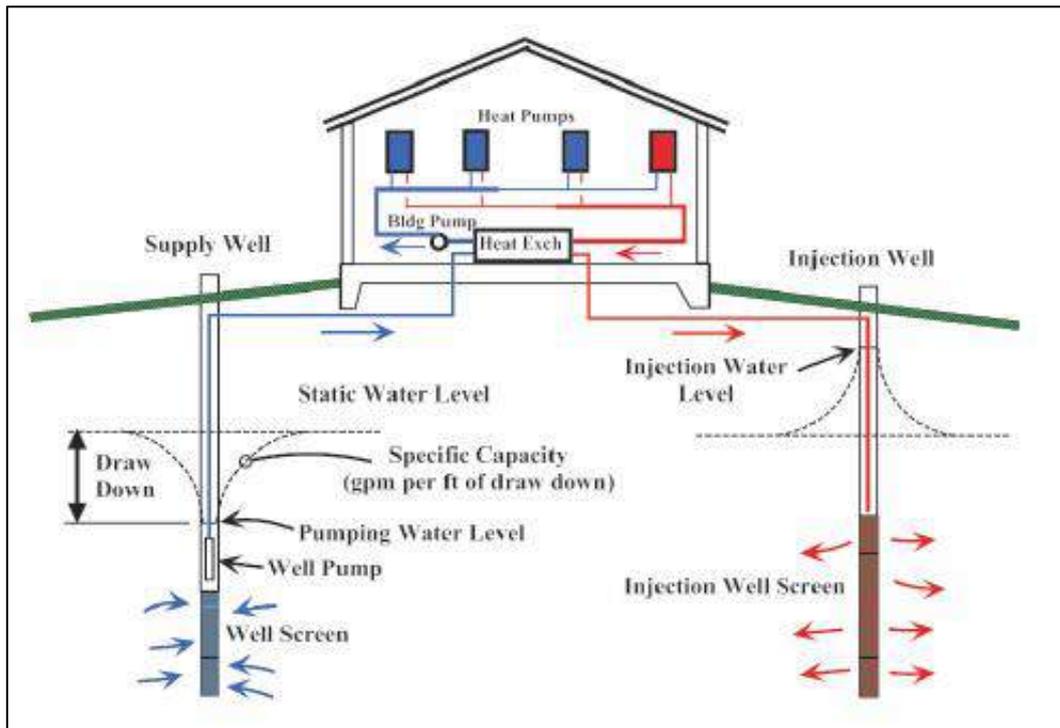


Figura 2.18: *schema semplificato di un impianto geotermico a bassa entalpia a circuito aperto ( KAVANAUGH & RAFFERTY, 2014)*

Nel caso di reimmissione di acque nel sistema idrogeologico, vanno rispettati i requisiti qualitativi indicati dal D.lgs 152/2006 in merito al generico scarico di acque in falda. Il Decreto impone delle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) da rispettare per varie tipologie di sostanze inquinanti ritenute cancerogene e non, e anche per altri composti chimici. Di seguito in Tabella 2.19 vengono riportate le CSC riguardanti esclusivamente i solventi clorurati, in quanto oggetto del presente studio.

	Acque sotterranee Valore limite (µg/L)	Acque superficiali Obiettivo di qualità (µg/L)
<b>ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI<sup>1</sup></b>		
Clorometano	1.5	
Diclorometano		20
Triclorometano	0.15	12
Tetraclorometano		12
Cloruro di Vinile	0.5	0.5
1,2-Dicloroetano	3	10
1,1-Dicloroetilene	0.05	
Tricloroetilene	1.5	10
Tetracloroetilene	1.1	10
Esaclorobutadiene	0.15	0.1
Sommatoria organoalogenati	10	
<b>ALIFATICI CLORURATI NON CANCEROGENI*</b>		
1,1-Dicloroetano	810	
1,2-Dicloroetilene	60	
1,2-Dicloropropano	0.15	
1,1,2-Tricloroetano	0.2	
1,2,3-Tricloropropano	0.001	
1,1,2,2-Tetracloroetano	0.05	

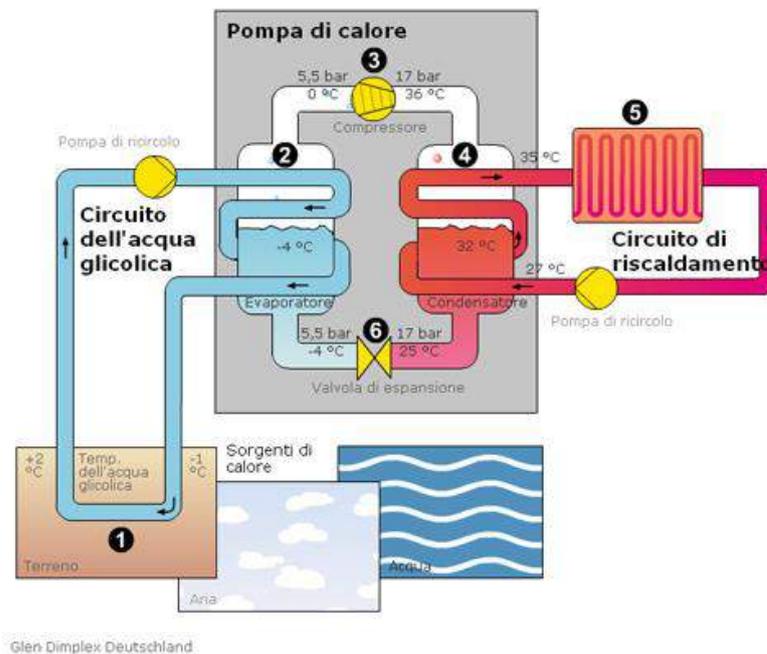
Tabella 2.19: concentrazioni soglia dei solventi clorurati nelle acqua di falda e in acque superficiali (D.lgs 152/2006, tab A)

### 2.6.2 Pompe di calore

Le pompe di calore rappresentano una tecnologia ormai consolidata nella climatizzazione. Una PdC è una macchina termica che permette di “pompare” il calore da un livello termico più basso ad uno più alto; ciò non può avvenire in maniera spontanea altrimenti sarebbe violato il secondo principio della termodinamica. Per ottenere questo è necessario compiere del lavoro, consumare cioè dell’energia (BASTA & MINCHIO, 2008). Nella formulazione di Clausius, il secondo principio della termodinamica asserisce che *“il passaggio spontaneo di calore avviene sempre dalla temperatura più alta a quella più bassa”*. È possibile che il calore vada “in salita” da un corpo freddo a uno più caldo, ma ciò non avviene spontaneamente; dobbiamo compiere del lavoro sul sistema affinché ciò accada. Una Pompa di Calore (Figura 2.20) compie del lavoro L per rimuovere una quantità di calore  $Q_f$  dalla sorgente fredda dell’aria esterna (nei sistemi *open-loop* la sorgente è rappresentata dall’acqua di falda), quindi cede un calore  $Q_c$  alla sorgente calda dell’aria della stanza (JAMES S. WALKER, 2010). Il calore acquistato dalla sorgente calda è:

$$Q_c = Q_f + L$$

In Figura 2.20 è mostrato il funzionamento di una pompa di calore.



*Figura 2.20: schema di funzionamento di una pompa di calore: 1-2 la fonte di calore (aria, acqua, terreno) tramite l'evaporatore, fornisce calore al liquido refrigerante il quale evapora. 3 Successivamente viene compiuto del lavoro dal compressore per comprimere il gas refrigerante aumentando la temperatura. 4-5 Nel condensatore i gas caldi cedano calore all'acqua dell'impianto di riscaldamento condensando. 6 Il liquido refrigerante passando attraverso una valvola di espansione si espande riducendo così la propria temperatura.*

Il Coefficiente di Performance (COP) indica la quantità di lavoro prodotto rispetto all'energia utilizzata ed è definito come il rapporto fra la potenza termica e la potenza elettrica espresse entrambe in W. Facendo un esempio una COP pari a 5 ci indica che dando 1 kWh elettrico alla PdC, la stessa ci da 5 kWh termici. Il secondo principio della termodinamica pone un limite al valore massimo di COP teoricamente raggiungibile da una macchina termica operante fra due temperature T1 e T2. Il valore di COP è massimo se si impiega il ciclo di Carnot e dipende unicamente dalle temperature T1 e T2 (temperature assolute espresse in gradi Kelvin,  $T [K] = T [^{\circ}C] + 273,15$ ). Tale coefficiente è pari a:

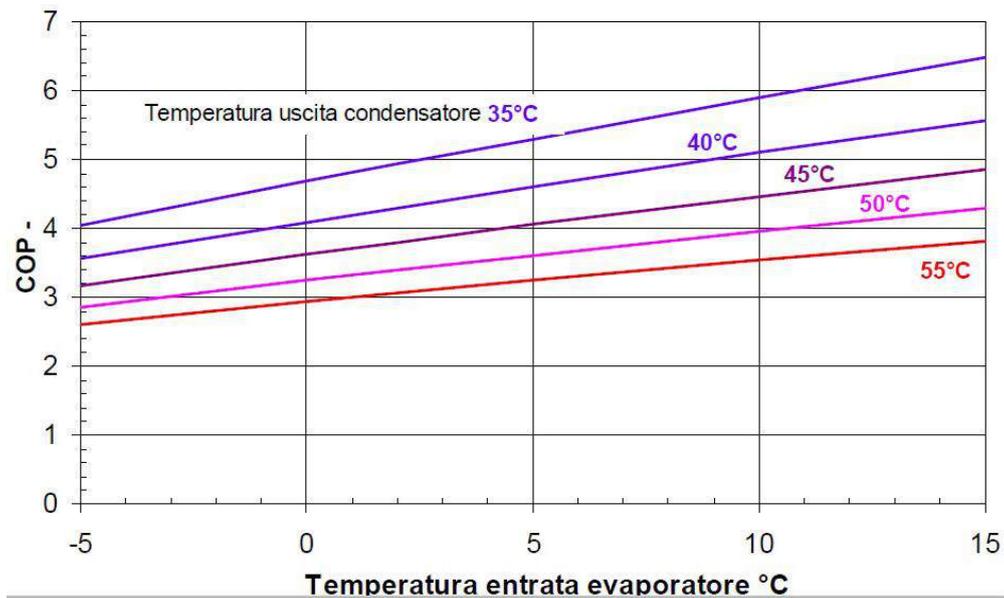
$$COP_{CARNOT} = T_2 / (T_2 - T_1)$$

Mentre se consideriamo che la PdC debba funzionare nel periodo estivo, il COP è invece pari a:

$$COP_{CARNOT} = T_1 / (T_2 - T_1)$$

Risulta opportuno ricordare che qualunque PdC presenta COP inferiori a quelli di CARNOT, ciò avviene a causa delle irreversibilità che caratterizzano il ciclo reale rispetto a quello teorico e alla non realizzabilità tecnica del ciclo ideale di Carnot caratterizzato da due trasformazioni isoterme e due trasformazioni adiabatiche (BASTA S., MINCHIO F., 2008).

Considerare valori di COP teorici risulterebbe errato e per tale motivo questi valori variano in base alla tipologia della PdC e vengono forniti dalle case costruttrici. PAHUD & GENERELLI nel 2002 hanno svolto uno studio mirato alle misure e al monitoraggio di un impianto geotermico a sonde verticali. Dalla campagna di monitoraggio della durata di due anni è stato possibile elaborare un diagramma (Figura 2.21) dei valori di COP rispetto alle temperature di entrata all'evaporatore e di uscite dal condensatore. Il diagramma mostra l'importanza di riscaldare con una temperatura più bassa possibile. Una casa nuova, costruita secondo classi energetiche medio-alte, con un riscaldamento a pavimento, permetterebbe di essere riscaldata con una temperatura all'uscita dal condensatore pari a 35°C massima. Il COP medio corrispondente risulterebbe superiore a 5.



*Figura 2.21: Coefficiente di prestazione (COP) della pompa di calore mostrato in funzione della temperatura all'entrata dell'evaporatore e per diverse temperature fisse all'uscita del condensatore (PAHUD & GENERELLI, 2002).*

### **3. MATERIALI E METODI**

### 3.1 APPROCCIO DI LAVORO

Il presente Capitolo illustrerà le metodologie di elaborazione dei dati utilizzate ai fini della modellazione numerica di un ipotetico impianto geotermico a bassa entalpia a circuito aperto integrato a bonifica *Pump and Treat*, potenzialmente realizzabile nell'acquifero contaminato del sito oggetto di studio.

Nel Capitolo precedente sono stati descritti rispettivamente il funzionamento degli impianti geotermici a bassa entalpia e della tecnica di bonifica *Pump and Treat* (paragrafi 2.5 e 2.6).

La Figura 3.1 mostra uno schema semplificato dell'ipotetico impianto integrato da applicare sul sito di studio. L'impianto include le seguenti componenti:

1. **Pozzi di estrazione:** in cui viene estratta l'acqua di falda attraverso l'utilizzo di una pompa elettrosommersa. Nei sistemi geotermici *open-loop* l'acqua sotterranea rappresenta il mezzo di scambio termico. Per i fini della bonifica, il numero ed il posizionamento ottimale dei pozzi di estrazione variano in base alla quantità dell'inquinante presente in falda e all'estensione del *plume*, mentre per i fini geotermici il numero dei pozzi può variare in base alla potenza termica richiesta dall'impianto e in base alle portate massime di estrazione e di immissione ottenibili nell'acquifero ospitante ;
2. **Cisterna di stoccaggio:** considerando che generalmente i siti a vocazione industriale sono dotati di cisterne di stoccaggio, può essere vantaggioso utilizzare queste cisterne, quando possibile, per aver maggior controllo sulle portate. Le cisterne di stoccaggio permettono installando opportuni totalizzatori di misurare il volume di acqua estratto e rappresentano un punto di campionamento per le acque. In assenza di queste, l'acqua estratta giungerà direttamente al sistema di filtraggio;
3. **Sistema di filtraggio:** in questa sezione avviene il trattamento dell'acqua di falda per mezzo di vari materiali adsorbenti quali, ad esempio, carboni attivi granulari (GAC) o in polvere (PAC), zeoliti a chabasite, zeoliti a philipsite. Il materiale più idoneo viene scelto in fase progettuale, dopo aver eseguito una caratterizzazione ambientale del sito;
4. **Pompa di calore:** l'acqua trattata e ripulita raggiunge la pompa di calore permettendo la produzione di energia termica, utilizzabile sia per il riscaldamento e sia per il raffrescamento;
5. **Pozzo di controllo:** collocato tra il sistema di filtraggio e i pozzi di immissione, permette di effettuare dei monitoraggi periodici per verificare l'efficacia del sistema di filtraggio a monte e quindi la qualità dell'acqua che sarà ri-immessa nel sistema;
6. **Pozzi di immissione:** l'acqua estratta tramite pozzi di estrazione, una volta trattata ed adoperata per la produzione di energia termica, viene ri-immessa in falda. L'acqua immessa avrà una temperatura differente rispetto a quella estratta. In particolare, la temperatura dell'acqua immessa sarà inferiore di quella estratta quando l'impianto geotermico è utilizzato per riscaldamento, e superiore in fase di raffrescamento.

## SCHEMA SEMPLIFICATO DI UN IMPIANTO INTEGRATO

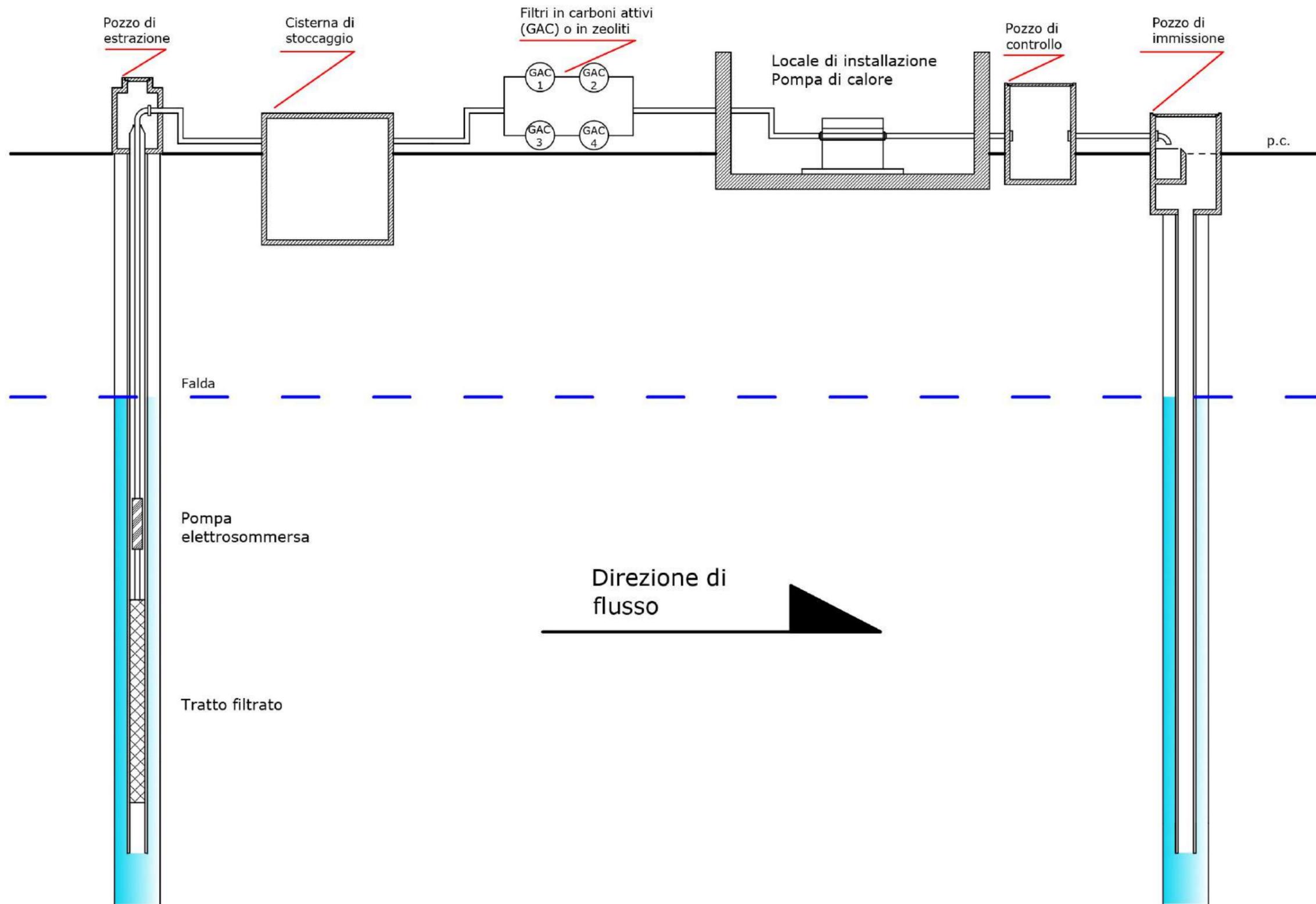


Figura 3.1: schema semplificato di un impianto di bonifica Pump and Treat accoppiato ad un impianto di climatizzazione geotermico a bassa entalpia di tipo open-loop (impianto integrato).

La presenza di un impianto come quello appena descritto è stata simulata nell'acquifero del sito oggetto di studio tramite modellazione numerica di flusso e trasporto. La modellazione numerica è stata eseguita tramite differenti codici di calcolo: MOFLOW per il flusso di falda (stato stazionario e transitorio), MODPATH per la ricostruzione delle traiettorie di flusso, MT3DMS per il trasporto di contaminanti (stato transitorio).

L'implementazione del modello numerico del sito è stata possibile grazie a tutti i dati ricavati da monitoraggi e prove effettuate durante una precedente fase di caratterizzazione (2005-2010) e di parziale bonifica (2010-2011) del sito oggetto studio.

Nel modello numerico non sono inclusi nè la cisterna di stoccaggio e nè il sistema di filtraggio, in quanto i codici di calcolo selezionati (MODFLOW, MODPATH, MT3DMS) sono concepiti per la simulazione dei soli aspetti idrogeologici (flusso di falda e trasporto di contaminanti). Riguardo al sistema di filtraggio (non incluso nel modello numerico), si considera che l'acqua in uscita da esso presenti concentrazioni degli inquinanti oggetto di studio al di sotto delle CSC (condizione necessaria per evitare fenomeni di corrosione di alcune componenti della pompa di calore e per una corretta immissione in falda secondo il D. lgs. 152/2006). Tale requisito era già soddisfatto da un precedente impianto di bonifica realizzato nello stesso sito nel 2010, che aveva già portato a parziale bonifica della contaminazione. Si considera quindi un impianto di bonifica del tutto analogo a quello già utilizzato nel 2010, che verrà qui integrato all'impianto geotermico.

Nei paragrafi seguenti saranno descritti: i metodi di elaborazione dei dati provenienti dalla caratterizzazione pregressa del sito (al fine di renderli informazione sfruttabile per la modellazione numerica); le principali logiche della modellazione numerica e le caratteristiche dei codici utilizzati; le tecniche di dimensionamento di un impianto geotermico; un metodo per la stima speditiva dei costi dell'impianto proposto.

### **3.2 METODI DI INTERPOLAZIONE DEI DATI PIEZOMETRICI E DI CONCENTRAZIONE DEI CONTAMINANTI**

Misure piezometriche e concentrazioni di contaminanti sono dati di natura molto differente tra loro, con una caratteristica comune: sono generalmente raccolti in modo puntuale (da pozzi o piezometri) e necessitano di essere interpolati per definirne una distribuzione continua nello spazio. L'interpolazione può avvenire tramite tecniche manuali o più frequentemente in modo automatico, tramite software ed algoritmi di interpolazione.

Il software qui utilizzato per l'interpolazione dei dati piezometrici e concentrazione di contaminanti è *Surfer Ver. 12 (Golden Software, Inc.)*. Si tratta di un software di mappatura basato su reticoli regolari di nodi (*grid file*) in grado di interpolare dati spaziali di coordinate note XYZ (dove Z rappresenta la variabile da interpolare). Il *grid file* viene poi utilizzato per produrre vari tipi di mappe, tra cui: mappe vettoriali, topografiche, piezometriche, superfici 3D e *wireframe* 3D. Nel software sono implementati differenti metodi di interpolazione, che consentono di produrre la carta che meglio rappresenta i dati. In questo lavoro sono stati

utilizzati due differenti interpolatori spaziali che hanno consentito di ricostruire sia la superficie piezometrica che i *plume* dei vari contaminanti. In particolare è stato utilizzato un interpolatore deterministico (MC minima curvatura) e uno stocastico (KU –*Kriging* Universale). La principale differenza tra le due classi di interpolatori consiste nel fatto che quelli deterministici non calcolano l'errore commesso nelle previsioni, ma si limitano all'elaborazione di sole mappe previsionali. Gli interpolatori stocastici definiscono anche l'errore attraverso l'uso di tecniche statistiche, creando non solo mappe di tipo previsionale, ma anche mappe dell'errore standard associato alla previsione effettuata, fornendo informazioni sull'attendibilità della stima (CENCETTI C, *et al.*, 2007).

Il metodo MC è stato utilizzato per la ricostruzione della superficie piezometrica. Questo è un metodo di interpolazione molto utilizzato nelle Scienze della Terra; la superficie di interpolazione generata in questo modo è assimilabile ad una membrana elastica passante attraverso tutti i punti con dati (in realtà passa a distanze minime da detti punti), con la minima curvatura possibile. Il vantaggio principale di questo metodo è che tende ad eliminare le piccole variazioni improvvise locali. Risulta quindi un interpolatore molto efficace nella ricostruzione di acquiferi omogenei e nella ricostruzione dell'andamento piezometrico di massima di acquiferi molto irregolari.

Per l'interpolazione dei dati di concentrazione dei contaminanti è stato invece utilizzato l'interpolatore KU, poiché è risultato il più efficace nella riproduzione dei *plume* osservati in campo. KU è il metodo di interpolazione più flessibile, adattandosi a quasi tutte le tipologie di dati. Il *Kriging* si basa sull'assunzione che il parametro che si intende interpolare possa essere trattato come una variabile regionale, ovvero che tra dati tra loro vicini esista una certa correlazione spaziale, mentre tra punti distanti vi sia una indipendenza statistica. Esso consiste in un complesso di metodologie idonee alla stima ottimale dei valori incogniti di una variabile regionale, ottenibile attraverso la minimizzazione dell'errore che si commette nello stimare il valore incognito in un punto qualsiasi sulla base di uno o più valori noti della stessa variabile in altri punti (CENCETTI C. *et al.*, 2007).

Sono di seguito descritte le fasi principali di creazione di una mappa da interpolazione di dati puntuali, tramite il software *Surfer*:

### **1. Creazione di un file XYZ**

Il file di partenza è un file excel che raccoglie i dati rilevati in campagna organizzati secondo un ordine preciso. I primi due valori rappresentano le coordinate cartesiane (X e Y) e servono per collocare il dato in un determinato punto dello spazio, mentre il valore Z rappresenta il dato rilevato (da interpolare), che nelle applicazioni geologiche può avere vari significati (es. valore altimetrico, piezometrico, barometrico, di concentrazione di un composto chimico, di temperatura, ecc.)

### **2. Creazione di un *grid file***

In questa fase i dati rilevati di partenza di tipo puntuale vengono riordinati dal software secondo un reticolo regolare di nodi. Le caratteristiche del reticolo ed i valori assegnati ai singoli nodi variano in base .

### 3. *Contouring*

In questa fase il software permette di elaborare graficamente il *grid file* creando, ad esempio, una mappa ad isolinee. È possibile formattare ed applicare vari tematismi alle mappe consentendo di produrre la carta che meglio rappresenta i dati.

### 4. *Overlay*

In quest'ultima fase è possibile sovrapporre in un'unica carta i risultati di diverse interpolazioni.

Le distribuzioni di carico piezometrico e concentrazione dei contaminanti ottenute nel sito di studio tramite la metodologia descritta saranno utilizzate in sede di modellazione numerica, sia per la definizione delle condizioni al contorno di flusso e trasporto (Cfr. Par. 5.3) sia per il controllo della rappresentatività degli output del modello.

## 3.3 RICARICA & CALCOLO DEL REGIME IDROLOGICO

Nella realtà fisica, non tutta l'acqua che precipita si infiltra nel terreno andando a ricaricare la falda. Infatti, in base alle caratteristiche climatiche (temperatura) e del terreno, un'aliquota della precipitazione totale si muove come deflusso superficiale, un'altra parte si infiltra come deflusso ipodermico, un'altra parte evapotraspira e un'altra si infiltra e per percolazione raggiunge la falda (MOISELLO, 1998). Per l'implementazione di un modello numerico del flusso di falda è necessario definire l'aliquota di precipitazione in grado di raggiungere la falda (nota anche come "infiltrazione efficace") poiché tale aliquota corrisponde al valore che verrà assegnato al modello come "condizione al contorno di ricarica" (Cfr. Par. 5.3.2).

Come accennato in precedenza, i fattori che concorrono a determinare l'infiltrazione efficace sono molteplici, come ad esempio la distribuzione spaziale e temporale delle precipitazioni, i parametri morfometrici del rilievo, la distribuzione delle temperature al suolo, le caratteristiche idrogeologiche e stratigrafiche delle formazioni affioranti, l'uso del suolo, ecc. Le dinamiche che si stabiliscono tra tali parametri sono caratterizzate da comportamenti sensibilmente non lineari; la loro modellazione richiede inevitabilmente un grado di approssimazione più o meno elevato (BRUGIONI *et al.*, 2008).

L'infiltrazione efficace ( $I_{eff}$ ) può essere determinata tramite la seguente equazione (BRUGIONI *et al.*, 2008):

$$I_{eff} = P_{eff} * CIP_g * CIP_{ps}$$

Dove:  $P_{eff}$  rappresenta la precipitazione efficace, ovvero la precipitazione totale diminuita dell'aliquota di evapotraspirazione;  $CIP_g$  è il coefficiente di infiltrazione potenziale di tipo geologico (dalla metodologia proposta da CELICO, 1988);  $CIP_{ps}$  è un altro coefficiente di infiltrazione potenziale che tiene conto sia della pendenza che dell'uso del suolo.

### 3.3.1 Stima dell'evapotraspirazione e determinazione della precipitazione efficace

La formula di Thornthwaite consente la stima della evapotraspirazione potenziale di riferimento, espressa in millimetri su base mensile (mm/mese) con il ricorso alla sola informazione sull'andamento delle temperature medie mensili  $T$  (MOISELLO, 1998).

L'equazione è uguale a:

$$ET_p = cT^a$$

Dove:  $T$  rappresenta la temperatura media del mese, espressa in gradi centigradi, mentre "c" ed "a" sono due parametri che dipendono dal clima del luogo considerato. I parametri a e c assumono la forma:

$$a = 0.016I + 0.5$$

$$c = 1.6 (10 / I)^a$$

Dove  $I$  rappresenta l'indice termico annuale ed è espresso dalla formula:

$$I = \sum^{12} (T_i/5)^{1.514}$$

Dove  $T_i$  indica la temperatura media mensile. Una volta determinata l'evapotraspirazione con le relazioni mostrate in precedenza, è possibile calcolare la precipitazione efficace ( $P_{eff}$ ) come:

$$P_{eff} = P - ET$$

Per la determinazione della  $P_{eff}$ , nel presente lavoro sono stati considerati i dati termometrici e pluviometrici di 8 anni (2007-2014) delle tre stazioni metereologiche più vicine al sito d'interesse. Le stazioni mostrate in Figura 3.2 sono le seguenti: Bologna urbana, Castel San Pietro e Mezzolara.

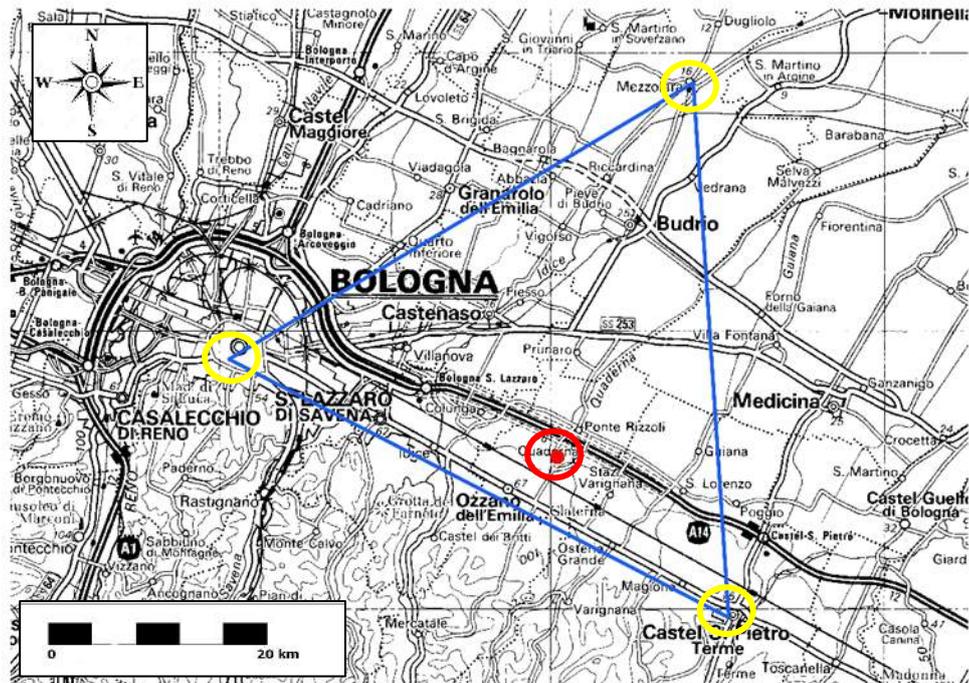


Figura 3.2: stazioni termopluviometriche considerate. I cerchi di colore giallo indicano l'ubicazione delle stazioni, mentre il cerchio di colore rosso indica l'area di studio.

### 3.3.2 Determinazione di $CIP_g$ e $CIP_{ps}$

Per la stima dei valori di  $CIP_g$  ci si è avvalsi di una tabella (Tabella 3.3) che considera i valori di infiltrazione potenziale relativi a differenti litologie (CIVITA, 2005). L'area di studio è caratterizzata principalmente da depositi alluvionali, pertanto è stato considerato un coefficiente  $CIP_g$  pari a 0,90 (equivalente al valore medio del range proposto per tali depositi).

complessi idrogeologici	c.i.p. % $D_p$	complessi idrogeologici	c.i.p. % $D_p$
calcari	90 ÷ 100	lave	90 ÷ 100
calcari dolomitici	70 ÷ 90	depositi piroclastici	50 ÷ 70
dolomie	50 ÷ 70	piroclastiti e lave	70 ÷ 90
calcari marnosi	30 ÷ 50	rocce intrusive	15 ÷ 35
detriti grossolani	80 ÷ 90	rocce metamorfiche	5 ÷ 20
depositi alluvionali	80 ÷ 100	sabbie	80 ÷ 90
depositi argilloso-marnoso-arenacei	5 ÷ 25	sabbie argillose	30 ÷ 50

Tabella 3.3: in tabella i differenti complessi idrogeologici e il relativo range di CIPg (CIVITA, 2005).

Per la stima del valore  $CIP_{ps}$ , sono state utilizzate le tabelle riportate in Figura 3.4 dove vengono individuate quattro classi di qualità (da E – elevata, fino a B - bassa) che hanno lo scopo di fornire una stima dell’influenza dei parametri considerati sulla capacità di infiltrazione. La definizione di una delle quattro classi discende da punteggi assegnati in base alla pendenza ed all’uso del suolo nel territorio oggetto di studio (BRUGIONI *et al.*, 2008). Nel caso analizzato nella presente tesi è stato attribuito un valore  $< 2\%$  alla pendenza (corrispondente alla classe 1) e l’uso del suolo è stato descritto come “area urbanizzata” (classe 10). Le classi così assegnate permettono di classificare il sito nella classe B, con un corrispondente valore di  $CIP_{ps}$  di 0.50.

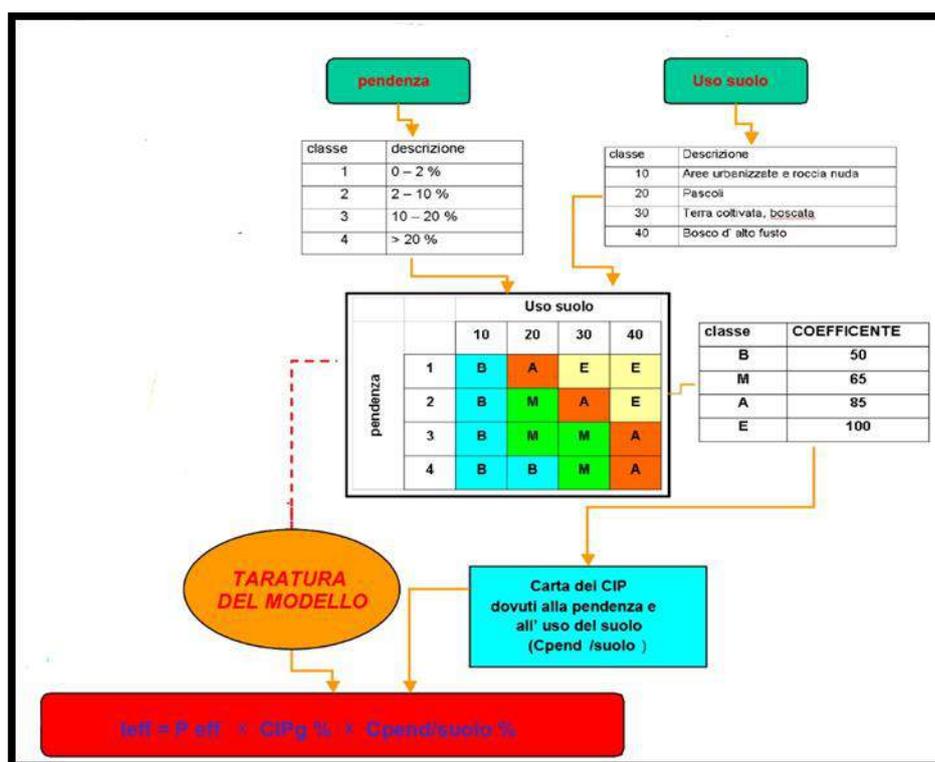


Figura 3.4: schema del modello per la stima del coefficiente di infiltrazione potenziale dovuto alla pendenza e all'uso del suolo (da BRUGIONI et al., 2008, modificata).

Considerando i coefficienti  $CIP_g$  e  $CIP_{ps}$  appena definiti, è stato possibile definire la seguente equazione per la stima dell'infiltrazione efficace nel sito di studio:

$$I_{eff} = P_{eff} (mese) * 0,90 * 0,50$$

### 3.4 MODELLAZIONE NUMERICA DI FLUSSO E TRASPORTO

Un modello numerico idrogeologico consiste in una rappresentazione semplificata di una realtà idrogeologica basata su equazioni differenziali. Tale modello è in grado di simulare i processi fisici che avvengono all'interno di una falda sulla base di determinati parametri interni e condizioni al contorno assegnate. Il principale scopo della modellazione numerica è quello di prevedere scenari futuri, in particolare nell'ambito della modellazione idrogeologica viene utilizzata per prevedere determinate situazioni di flusso e trasporto di contaminanti nel mezzo poroso. Con il termine "analisi/modellazione numerica" si intende l'applicazione di algoritmi relativamente semplici per ottenere una soluzione approssimata di equazioni differenziali complesse che descrivono il fenomeno indagato (es. flusso di falda o trasporto di contaminanti in falda). Nel corso degli anni sono stati sviluppati vari metodi

di calcolo (metodi numerici) che forniscono soluzioni più o meno approssimate in funzione dell'approccio: si annoverano tra questi i metodi alle differenze finite (FDM), i metodi alle differenze integrate finite, i metodi agli elementi finiti (FEM) ed equazioni integrali. I principali codici numerici utilizzati nel presente studio sono *MODFLOW* (per la modellazione del flusso) e *MT3DMS* (per la modellazione del trasporto), entrambi basati sul metodo delle differenze finite (*FDM - Finite Differences Method*).

In generale, la realizzazione di un modello numerico prevede varie fasi, schematizzate in Figura 3.5.

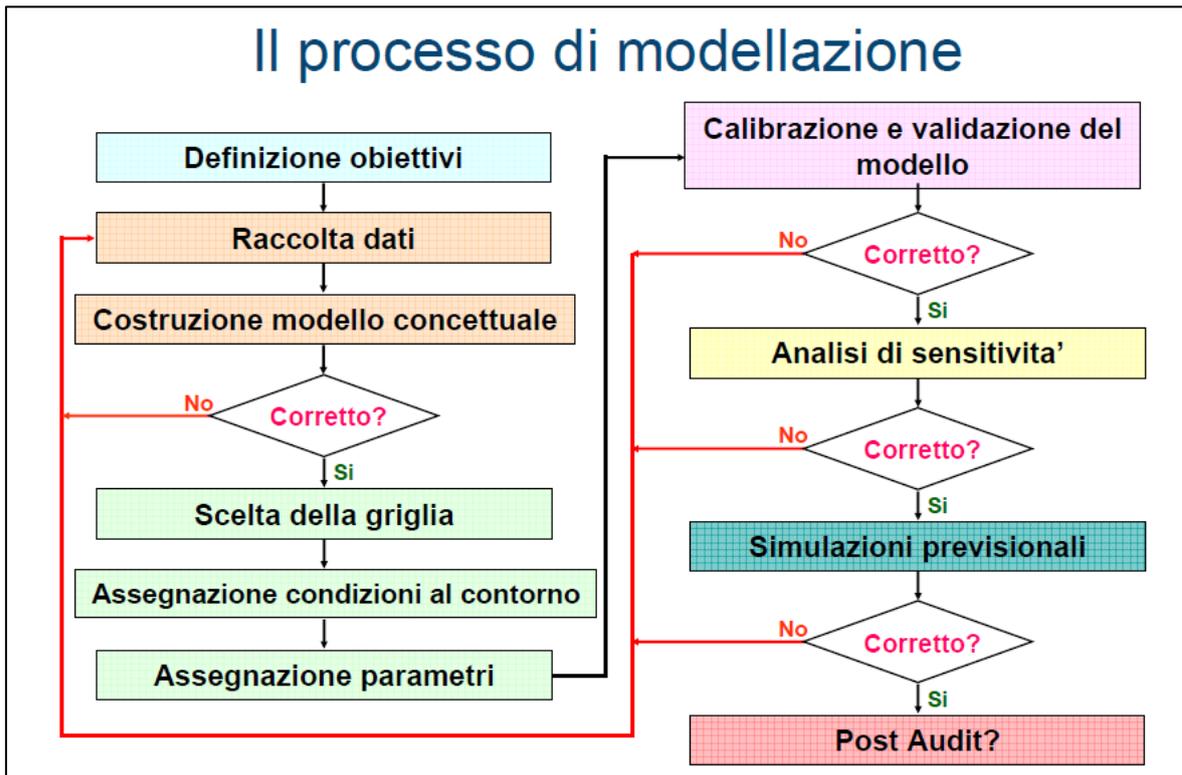


Figura 3.5: Diagramma di flusso riguardante le varie fasi del processo di modellazione (ANDERSON AND WOESSNER, 1991)

Per una descrizione dettagliata delle varie fasi di modellazione si rimanda a manuali specifici (es. ANDERSON AND WOESSNER, 1991; SPITZ AND MORENO, 1996).

### 3.4.1 Il codice Modflow

Il codice di calcolo utilizzato in questo lavoro di tesi è *MODFLOW* (*MODular three-dimensional finite-difference groundwater FLOW model*; HARBAUGH, 2000), sviluppato da U.S.G.S. (*United States Geological Survey*) negli anni '70. *MODFLOW* è un codice di calcolo alle differenze finite che, associato ad altri codici quali *MODPATH* e ad *MT3DMS* (ZHENG, 1999), permette di simulare il flusso e trasporto di massa negli acquiferi. Nel campo dell'idrogeologia questi codici di calcolo sono tra i più diffusi per affrontare problematiche ambientali e prevedere dal punto di vista quantitativo e qualitativo il comportamenti degli acquiferi sottoposti a determinati stress. Tutti i codici nominati sono

stati utilizzati per il presente lavoro, tramite una singola interfaccia grafica in grado di farli interagire tra loro. Tale interfaccia è *Visual Modflow Flex ver. 2015* (Waterloo Hydrogeologic ©). *MODFLOW* è un codice di calcolo (compilato in *Fortran 77*) che risolve numericamente l'equazione di flusso per le acque sotterranee in un mezzo poroso tridimensionale, utilizzando un metodo alle differenze finite centrato sulla cella (“*block-centered*”). Per risolvere l'equazione di flusso (descritta più avanti nel paragrafo) è necessario discretizzare sia orizzontalmente e sia verticalmente un dominio in elementi unitari e omogenei (Figura 3.6), ove in ognuno di questi elementi verranno applicati il *set* di equazioni algebriche del modello matematico. Per discretizzare il dominio si ricorre all'utilizzo di una griglia, che lo suddivide in celle alle quali vengono assegnate sia le condizioni iniziali e al contorno sia le proprietà fisiche ed idrogeologiche, considerate omogenee all'interno della cella stessa, ed attribuite al centro della cella (MCDONALD AND HARBAUGH, 1988). Tali informazioni permettono di risolvere sistemi di equazioni algebriche derivati da approssimazioni dell'equazione differenziale di flusso, ottenendo una soluzione di tali equazioni (ovvero un valore di carico idraulico) al centro di ogni cella. Tanto più fine è la discretizzazione operata, tanto più il risultato approssimato di distribuzione del carico idraulico fornito dal modello sarà vicino alla soluzione reale. Questo processo permette di tenere in considerazione tutte le eterogeneità e le caratteristiche geologiche\idrogeologiche di una determinata area.

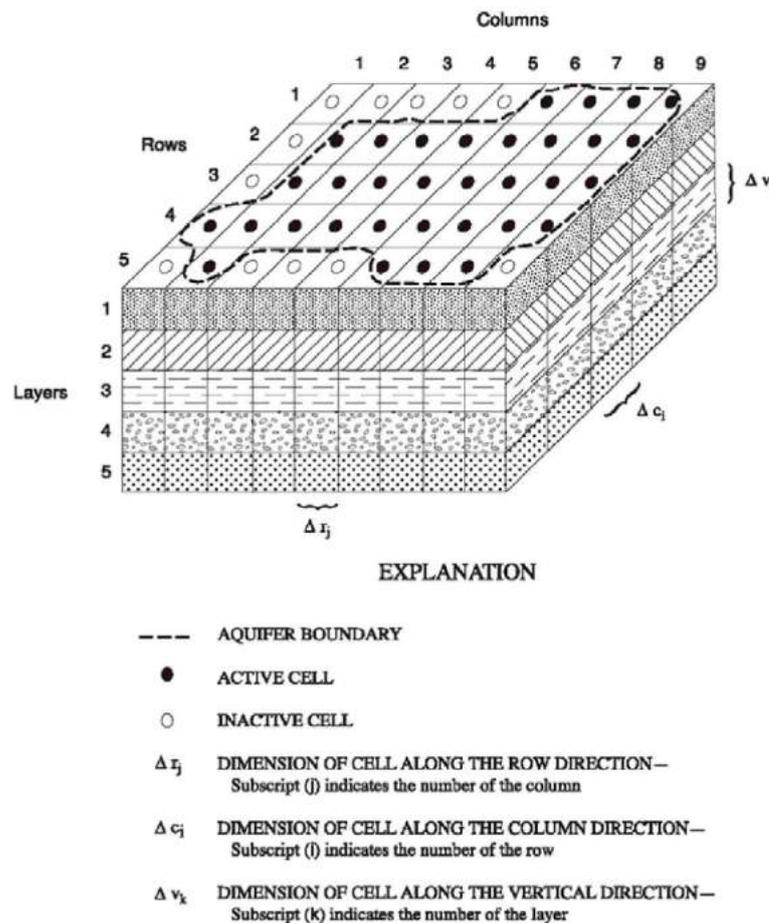


Figura 3.6: Discretizzazione di un ipotetico sistema di acquiferi (MCDONALD AND HARBAUGH, 1988.)

Considerando gli aspetti temporali, i modelli numerici di flusso si suddividono in stazionari e in transitori. Nei primi i risultati delle simulazioni rappresentano le condizioni all'equilibrio del sistema; mentre, nei secondi, i risultati delle simulazioni rappresentano l'evoluzione della soluzione del sistema nel tempo.

### Equazione di Flusso

La seguente equazione alle differenze parziali è quella che regola il flusso delle acque sotterranee in MODFLOW ed è conosciuta come “equazione di flusso” (SPITZ AND MORENO, 1996):

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

dove:

- $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  sono i valori di conducibilità idraulica lungo le tre direzioni principali  $x, y, z$  ( $L/T$ );
- $H$  è il carico piezometrico ( $L$ );
- $W$  è il flusso volumetrico per unità di volume, che rappresenta le entrate e le uscite di acqua da un volume infinitesimo di controllo ( $T^{-1}$ );
- $S_s$  è l'immagazzinamento specifico del materiale poroso ( $L^{-1}$ );
- $T$  è il tempo ( $T$ ).

Questa equazione, associata alle condizioni iniziali ed al contorno, descrive il flusso di falda transitorio tridimensionale in mezzi eterogenei ed anisotropi lungo le direzioni principali. Si deriva combinando la legge di Darcy (conservazione della quantità di moto con equilibrio fra forze inerziali e forze viscosse) con il principio di conservazione della massa (equazione di continuità). La variazione totale del flusso nelle tre dimensioni nello spazio è uguale alla variazione dell'immagazzinamento. I parametri fondamentali su cui si basa questa equazione sono rispettivamente la permeabilità ( $K$ ) e l'immagazzinamento ( $S_s$ ). In particolare in un modello a regime stazionario (*steady state*) non avviene nessun cambiamento di direzione o modulo del flusso nel tempo ( $S_s$  rimane costante) e la distribuzione dei carichi dipenderà esclusivamente dalla permeabilità ( $K$ ). In regime transitorio (*transient state*) sono possibili cambiamenti di entità e di direzione del flusso nel tempo ( $S_s$  è variabile) e la distribuzione dei carichi idraulici dipenderà sia da  $K$  e sia da  $S_s$  (HARBAUGH, 2005). Lo stato transitorio presenta la maggior complessità di implementazione e viene utilizzato per simulare situazioni idrogeologiche non costanti, mentre lo stato stazionario è utilizzato per simulare una piezometria rappresentativa di condizioni idrogeologiche medie su un intervallo

temporale statisticamente significativo (alcuni anni) e/o per simulare situazioni idrogeologiche costanti.

### **Condizioni iniziali e condizioni al contorno**

Le condizioni iniziali di un modello di flusso rappresentano la distribuzione dei carichi idraulici nel dominio di modellazione, all'inizio (tempo = zero) della simulazione. Nel caso di un modello di trasporto dei contaminanti, le condizioni iniziali corrispondono invece alla distribuzione di concentrazione delle varie specie contaminanti al tempo zero della simulazione. Tali condizioni vengono assegnate al centro delle celle su tutta l'area coperta dalla griglia di modellazione.

Le condizioni al contorno di un modello di flusso rappresentano le perdite o sorgenti di flusso che agiscono tra il dominio di modellazione e l'esterno di esso (nel caso di un modello di trasporto si parla invece di sorgenti o perdite di contaminante). In altri termini, si tratta di asserzioni matematiche che, ai limiti del dominio considerato, specificano la variabile dipendente, ovvero il carico idraulico, oppure la sua derivata, il flusso (nel caso di modelli di flusso) o la concentrazione di specie contaminanti (nel caso di modelli di trasporto), durante tutto il tempo della simulazione. Nei modelli di flusso delle acque sotterranee è possibile utilizzare tre tipi di condizioni al contorno:

#### Condizione del 1° Tipo (o condizione di Dirichelet)

$$h(x,y,z,t) = \text{fisso}$$

il carico idraulico ( $h$ ) è specificato, e costante nel tempo. Questa condizione è utilizzata per rappresentare limiti ad altezza piezometrica specificata, dati ad esempio dalla presenza di vasti corpi d'acqua o dalla distribuzione dei carichi idraulici ai limiti del dominio. Un esempio di condizione al contorno del 1° tipo applicabile tramite il codice Modflow è il *Constant Head* (condizione di carico costante)

Per i modelli di trasporto (codice MT3DMS), questo tipo di condizione trova un analogo nella condizione di concentrazione costante (*Constant Concentration*);

#### Condizione del 2° Tipo (o condizione di Neumann)

$$dh(x,y,z,t) / dn = \text{fisso}$$

È specificato il flusso attraverso una determinata cella ( $dh/dn$ , dove  $n$  rappresenta un vettore direzionale perpendicolare al confine). Questa condizione è utilizzata per rappresentare limiti a flusso specificato, per i quali la derivata dell'altezza piezometrica attraverso il limite è nota (es. flussi da e verso corpi d'acqua superficiali, i deflussi sotterranei della falda ai limiti del dominio, l'estrazione dell'acqua o la sua immissione attuata da pozzi di prelievo e sorgenti, condizioni di assenza di flusso). Alcuni esempi di condizione al contorno del 2° tipo applicabili tramite Modflow sono: *No flow* (condizione di flusso nullo), *Recharge* (condizione di ricarica) e *Well* (condizione pozzo – in immissione o estrazione);

Per i modelli di trasporto, questo tipo di condizione è specificato come flusso di contaminante (es. una concentrazione di contaminante applicata alla ricarica, *Recharge Concentration*).

Condizione del 3° Tipo (o condizione di Cauchy)

$$dh/dn + ch = \text{fisso} ; \quad c = \text{costante}$$

Tale condizione mette in relazione il carico nella cella ( $h$ ) con il flusso che attraversa la cella stessa ( $dh/dn$ ). Sono condizioni di tipo misto in cui il flusso attraverso il limite è calcolato in dipendenza di un carico idraulico definito al limite stesso. Grazie alla loro “adattabilità”, sono utilizzate al fine di simulare numerosi limiti idrogeologici “complessi” tra i quali fontanili, presenza di fiumi (nel caso in cui il loro rapporto con la falda non sia ben conosciuto), presenza di laghi o dreni artificiali. Alcuni esempi di condizione al contorno del 3° tipo applicabili tramite Modflow sono: *River* (condizione fiume) e *Drain* (condizione dreno).

In questo lavoro sono state utilizzate le seguenti condizioni al contorno per simulare il flusso:

- **COSTANT HEAD** (carico costante): condizione del primo tipo, utilizzata per simulare il carico idraulico ai bordi esterni del dominio;
- **RECHARGE** (ricarica): condizione del secondo tipo, utilizzata per simulare l’infiltrazione efficace;
- **WELL** (pozzi) condizione del secondo tipo, utilizzata per simulare il sistema di pompaggio e di immissione adoperato nell’impianto oggetto di studio;
- **RECHARGE CONCENTRATION** (concentrazione associata alla ricarica): condizione del secondo tipo utilizzata per simulare la contaminazione presente nel sito di studio.

### 3.4.2 Il codice Mt3dms

*MT3D* (*Modular Transport 3D*) è un codice per la simulazione del trasporto di massa tridimensionale creato da Zheng (1990). È utilizzato soprattutto per la modellazione del trasporto di inquinanti e la valutazione degli studi di bonifica.

Nell’ultima versione, denominata *MT3DMS* (*Modular Transport 3D Multi-Species*), il codice possiede un *set* di opzioni completo per la simulazione di advezione, dispersione e reazioni chimiche di contaminanti nel flusso di falda, sotto condizioni idrogeologiche generali. *MT3DMS* può essere utilizzato quindi per simulare variazioni di concentrazione di contaminanti in falda. In particolare è in grado di simulare più specie in fase acquosa che non interagiscono tra loro. Inoltre è stato progettato per essere utilizzato con qualsiasi modello di flusso alle differenze finite “*block-centered*”, come ad esempio il codice *MODFLOW* a cui è normalmente accoppiato.

*MT3DMS* è basato sull’assunzione che i cambiamenti nel campo delle concentrazioni non influenzino significativamente il campo del flusso (esistono altri codici di calcolo della

stessa famiglia in grado di simulare il flusso e il trasporto densità-dipendente, come ad esempio SEAWAT).

Il principio del codice è analogo a quello già descritto per MODFLOW. Un'equazione differenziale che descrive il trasporto advettivo-dispersivo-reattivo dei contaminanti in falda (nota come equazione di trasporto) viene approssimata ad un sistema di equazioni algebriche in ogni maglia della griglia di modellazione. La risoluzione di tali equazioni algebriche, possibile a valle della definizione di condizioni iniziali ed al contorno di trasporto e delle proprietà fisico-chimiche del mezzo idrogeologico e delle varie specie chimiche coinvolte, fornisce un valore di concentrazione del contaminante al centro di ogni cella del dominio.

In questo lavoro, per simulare una sorgente di contaminazione di Tetracloroetilene e 1,1 Dicloroetilene è stata utilizzata una condizione al contorno di trasporto del 2° tipo (flusso noto di concentrazione, o concentrazione applicata alla ricarica) sia a partire dai modelli di flusso stazionari che transitori. Il valore di concentrazione alla ricarica assegnato è stato fatto variare nel tempo, per meglio adattarsi alle informazioni note riguardo alla storia di contaminazione del sito ed alle osservazioni di campo.

### Equazione di trasporto

L'equazione alle differenze parziali che descrive il trasporto e le reazioni di una specie  $k$  (es. un contaminante) in sistemi tridimensionali con flusso di falda è scritta come segue (ZHENG *et al.*, 1999):

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n$$

Dove:

- $\theta$ , porosità del terreno (-);
- $C^k$ , concentrazione disciolta della specie  $k$  ( $ML^{-3}$ );
- $t$ , tempo ( $T$ );
- $x_{i,j}$ , distanza lungo il rispettivo asse cartesiano ( $L$ );
- $D_{i,j}$ , tensore del coefficiente di dispersione idrodinamica ( $L^2T^{-1}$ );
- $v_i$ , velocità dell'acqua ( $LT^{-1}$ );
- $q_s$ , quantità di flusso volumetrico per unità di volume di acquifero che rappresenta gli ingressi (se positiva) o le dispersioni (se negativa);
- $ks^C$ , concentrazione del flusso in ingresso o in uscita per la specie  $k$  ( $ML^{-3}$ );
- $\sum R_n$ , termine di reazione chimica ( $ML^{-3}T^{-1}$ ).

Questo codice consente di trovare una soluzione approssimata, in tre dimensioni, per l'equazione del trasporto con tutte le sue componenti, cioè quella convettiva, dispersiva e reattiva. MT3DMS utilizza come input i risultati ottenuti dal MODFLOW, infatti per risolvere l'equazione del trasporto è necessario conoscere la velocità effettiva lineare del flusso. MT3DMS mantiene la stessa struttura modulare del codice MT3D, la quale rende possibile simulare differenti componenti del trasporto in particolare:

- advettiva, descrive il trasporto di un contaminante miscibile che viaggia alla stessa velocità delle acqua sotterranee. Il parametro di input specifico per la modellazione della componente advettiva del trasporto è la porosità;
- dispersiva, descrive l'allargamento o sparpagliamento del contaminante nell'ambito di una regione più ampia di quella derivabile dalla sola componente advettiva. Parametri di input specifici per la modellazione della componente dispersiva del trasporto sono la *dispersività longitudinale* ( $\alpha_L$ ), la *dispersività trasversale* ( $\alpha_T$ ), *dispersività verticale* ( $\alpha_V$ ) ed il *coefficiente di diffusione molecolare* ( $D^*$ ), che combinati vanno a formare il coefficiente di dispersione idrodinamica ( $D$ );
- reattiva, si intendono i ritardi dovuti all'adsorbimento o a fenomeni di biodegradazione. L'adsorbimento riproduce il trasferimento di massa tra il contaminante disciolto in acqua (fase acquosa) ed il contaminante adsorbito nella matrice del mezzo poroso (fase solida). Questo processo tipicamente produce un ritardo rispetto alle sole componenti del trasporto advettiva e dispersiva. Il parametro di input specifico per la modellazione della componente di adsorbimento del trasporto è il *coefficiente di partizione solido-liquido* ( $K_d$ ). La biodegradazione viene associata al termine reattivo dell'adsorbimento dell'equazione del trasporto  $\sum R_n$  e il parametro di input associato alla componente degradativa del trasporto è dato dal *rapporto di decadimento* ( $\lambda$ ).

Nel caso di studio è stata utilizzata l'equazione per simulare le componenti del trasporto advettive, dispersive e reattive. Per quanto riguarda la componente reattiva è stata considerata soltanto la reazione di adsorbimento sia per assumere un approccio più cautelativo (nel considerare la non degradazione dei contaminanti investigati) e sia perché non sono state raccolte evidenze di prodotti di degradazione.

### 3.4.3 I modelli di calore e il codice Modpath

Negli impianti geotermici a circuito aperto è importante verificare la distribuzione del calore per determinare il rendimento dell'impianto nel breve e lungo termine evitando il fenomeno della corto-circuitazione termica (MILNES, 2013). Questi fenomeni si hanno quando l'acqua reiniettata torna ai pozzi di prelievo comportando un peggioramento delle performance della pompa di calore. Esistono vari codici sia commerciali (es. SHEMAT, FEFLOW) e sia open source (es. HST3D, SUTRA, TOUGH2) che permettono di modellare il calore, inoltre pubblicazioni recenti (PICCININI *et al.*, 2012) mostrano come l'utilizzo di codici che nascono per modellare l'intrusione salina (SEAWAT) possano essere utilizzati anche per modellare il calore. In questo lavoro non è stato realizzato un vero e proprio modello del calore in aggiunta al modello di flusso e trasporto (che rappresenterebbe comunque un'interessante sviluppo futuro), ma ci si è limitati ad analizzare le traiettorie

avvettive di particelle fluide in partenza e in arrivo ai pozzi di pompaggio ed immissione, tramite il codice di calcolo MODPATH.

Il codice MODPATH (POLLOCK, 1994) permette il tracciamento delle traiettorie e velocità di flusso di particelle fluide. Il codice si basa sulle distribuzioni di carico restituite da MODFLOW ed utilizza un algoritmo semi-analitico per tracciare il percorso ed i tempi di percorrenza delle particelle trasportate da meccanismi puramente advettivi. Con tale codice possono essere utilizzati gli schemi advettivi in avanzamento (“particelle *forward*”) ed in retrocessione (“particelle *backward*”), sia a partire da modelli di flusso in regime stazionario che in regime transitorio.

Nel presente lavoro, applicando delle particelle *backward* ai pozzi di estrazione e delle particelle *forward* ai pozzi di immissione, è stato possibile verificare la presenza di eventuali “interazioni” tra le acque pompate e quelle ri-immesse. Tale analisi permette di individuare l’eventuale presenza di fenomeni di corto-circuitazione termica, ma non permette di valutare né l’entità della corto-circuitazione termica e né l’estensione dei *plume* termici.

### 3.5 DIMENSIONAMENTO DI UN IMPIANTO GEOTERMICO OPEN-LOOP

Nella progettazione di un impianto geotermico a bassa entalpia sia *closed-loop* e sia *open-loop*, così come in tutti gli impianti di climatizzazione tradizionali, il parametro principale di partenza necessario per dimensionare l’impianto è rappresentato dal fabbisogno energetico dell’edificio ( $F_T$ ). Nell’attuale sistema di riferimento normativo UNI, la determinazione del fabbisogno di energia termica di un edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, avviene con la norma UNI TS 11300-1 del 2008; successivamente, con la UNI TS 11300-2 si determinano il fabbisogno di energia primaria e i rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di Acqua Calda Sanitaria (ACS) (FROLDI, 2013). Per dimensionare un impianto geotermico *open-loop* di solito si procede in tre step:

1. Calcolo del fabbisogno termico dell’edificio ( $F_T$ ) come previsto dalla normativa UNI TS 11300-2. Risulta opportuno ricordare che per eseguire tale calcolo (di natura ingegneristica) è necessaria una adeguata conoscenza di tutte le caratteristiche dell’edificio (cubatura, tipologia e dimensioni infissi, qualità costruttiva edificio, esposizione climatica dell’edificio, ecc);
2. Calcolo della Potenza all’evaporatore ( $P_e$ ):

$$P_e = F_T * \left( \frac{COP - 1}{COP} \right)$$

$COP =$  Coefficiente di Performance (Paragrafo 2.6.2)

3. Calcolo della portata di estrazione e di immissione necessaria a soddisfare la potenza all’evaporatore richiesta

$$P_e = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \rightarrow \dot{m} = \left( \frac{P_e}{c_p \cdot \Delta T} \right)$$

dove:

- **P<sub>e</sub>**, *potenza termica richiesta all'evaporatore in kW*;
- **ṁ**, *portata massica in Kg/s*;
- **c<sub>p</sub>**, *calore specifico a pressione costante, in funzione della temperatura = 4.187 kJ/(kg °C)*;
- **ΔT**, *salto termico, differenza di temperatura dell'acqua di falda tra prelievo e restituzione.*

È bene sottolineare che tutti i calcoli riguardanti il dimensionamento degli impianti geotermici a bassa entalpia sia *open-loop* e *closed-loop* hanno senso soltanto se alla base c'è una adeguata conoscenza delle caratteristiche geologiche e idrogeologiche dell'area. Per questo motivo risulta necessario in fase preliminare eseguire dei sondaggi e delle prove geognostiche per determinare il modello geologico e idrogeologico del sito.

In questo lavoro, non sono state calcolate portate di estrazione e di immissione *ad hoc* per il condizionamento di un determinato edificio, bensì sono state considerate in una prima analisi le portate di estrazione dell'impianto di bonifica *Pump & Treat* adoperate nel 2010 nel sito oggetto di studio e di seguito sono state verificate attraverso i modelli numerici di flusso. Una volta definite le portate massime utilizzabili nel sito di studio, per completezza di lavoro, si è comunque proceduto a stimare la potenza termica ottenibile dalle portate applicate all'impianto oggetto di studio e, di conseguenza, quale cubatura e superficie di un ipotetico edificio sarebbe possibile climatizzare tramite tale impianto. Per determinare la superficie calpestabile di un ipotetico edificio civile condizionabile tramite l'impianto simulato, si è proceduto con un calcolo a ritroso, facendo alcune assunzioni:

- L'impianto oggetto di studio è considerato reversibile, utilizzabile in riscaldamento nella stagione invernale e in raffrescamento nella stagione estiva;
- Il ΔT è un parametro fissato dalle case costruttrici di pompe di calore ed è stato posto pari a 3°;
- Il COP è anch'esso un parametro fissato dalle case costruttrici di pompe di calore e varia da modello a modello. Seppure i modelli di ultima generazione presentino COP superiori, è stato posto come valore 5, in quanto la maggior parte dei modelli attualmente utilizzati lavorano con questo valore;
- Non conoscendo le caratteristiche dell'edificio che si andrà a realizzare, F<sub>T</sub> è stato calcolato invertendo la formula proposta per il P<sub>e</sub>;
- La cubatura è stata determinata considerando una tabella (Tabella 3.7), generalmente utilizzata nelle fasi preliminari dei progetti degli impianti di riscaldamento (GUADAGNI, 2010), tramite cui è possibile stimare il fabbisogno energetico per le diverse tipologie edilizie in funzione di

opportuni coefficienti. È stata considerata una categoria edilizia a destinazione residenziale/civile con una altezza (h) dei vani pari a 3 metri. Per determinare la superficie calpestabile (A), anche in questo caso si è proceduti a ritroso, conoscendo il  $F_T$  determinato dalla formula inversa precedentemente citata e dividendolo per il coefficiente termico (k) e l'altezza dei vani. Di seguito la formula utilizzata:

$$A = F_T / (k \cdot h)$$

Tipologia edilizia	Tipo di impianto	Temperatura esterna (°C)	Umidità relativa esterna (%)	Temperatura interna (°C)	Umidità relativa interna (%)	Ricambi aria (volumi/ora)	Coefficiente preliminare di fabbisogno termico (W/m <sup>3</sup> )
Edificio di civile abitazione	A radiatori	-5	80	+20	50	0,5	24
Stabilimento tipografico (coperturasfittate isolato)	Termostrisce radianti	-5	80	+19	60	1,5	21
Capannoni lavorazioni industriali (copertura a shed)	Termostrisce radianti	-5	85	+21	50	1,5	40
Palazzo uffici	Ventilconvettori e aria primaria	-2	80	+20	50	2	22
Capannone adibito a magazzino	Aerotermi	-2	80	+10	65	1	10
Hotel	A tutt'aria	0	70	+22	55	Camere 1,5 Ristorante 5 Servizi 7	22
Edificio scolastico	A radiatori	-2	80	+20	50	1,5	26
Laboratori di ricerca	A tutt'aria	-10	90	+21	50	3	55

Tabella 3.7: Tabella dei coefficienti preliminari di fabbisogno termico (GUADAGNI, 2010).

### 3.6 ANALISI DEI COSTI

È stata affrontata un'analisi speditiva dei costi richiesti per l'impianto integrato discusso nel presente lavoro, confrontandolo con i costi richiesti per un sistema tradizionale. Il sistema tradizionale considerato svolge le medesime funzioni di bonifica e condizionamento di quello integrato, ma è costituito da due impianti indipendenti: un impianto di bonifica *Pump and Treat* ed un impianto di riscaldamento e raffrescamento costituito da una caldaia a metano e un gruppo frigo entrambi con terminali a *fancoil* chiamati anche *ventilconvettori* (DONINELLI, 1994).

Per determinare i costi relativi alla realizzazione ed alla gestione dei due sistemi, è stata elaborata grazie alla collaborazione di Geo-Net s.r.l una formula applicabile ad entrambi i sistemi (integrato e tradizionale). In questa formula vengono considerati gli investimenti iniziali per la realizzazione dell'impianto di bonifica e dell'impianto di climatizzazione, e tutti i relativi costi di gestione.

$$C_{TOT} = I_B + I_{CL} + n \cdot (CG_B) + m \cdot (CG_{CL})$$

Dove:

- $C_{TOT}$  è il costo totale dell'impianto considerando sia la realizzazione e la gestione dell'impianto di bonifica e di climatizzazione;
- $I_B$  è l'investimento iniziale sostenuto per la realizzazione dell'impianto di bonifica;
- $I_{CL}$  è l'investimento iniziale sostenuto per la realizzazione dell'impianto di climatizzazione;
- $n$  è il numero di anni di utilizzo dell'impianto di bonifica;
- $CG_B$  rappresentano i costi di gestione dell'impianto di bonifica sostenuti dopo un anno di utilizzo;
- $m$  è il numero di anni di utilizzo dell'impianto di climatizzazione, normalmente viene posto a 20 anni;
- $CG_{CL}$  rappresentano i costi di gestione dell'impianto di climatizzazione sostenuti dopo un anno di utilizzo;

Riguardo all'impianto *Pump and Treat*, l'analisi si è basata sui costi sostenuti per la realizzazione del progetto di bonifica del 2010 nel medesimo sito, mentre tutti i costi riguardanti gli impianti di climatizzazione tradizionali e geotermici sono stati ipotizzati basandosi su informazioni fornite dallo staff di Geo-Net s.r.l., azienda leader nel settore della geotermia a bassa entalpia.

## **4. PRESENTAZIONE DEI DATI**

Nel presente Capitolo verranno mostrati i principali dati geologici, idrogeologici e di contaminazione relativi al sito di studio, raccolti durante campagne di indagine condotte dalla ditta Geo-Net s.r.l., precedentemente al lavoro di tesi (anni 2005-2011). Tali dati pregressi sono stati utilizzati nel presente lavoro per l'implementazione del modello numerico di flusso e trasporto del sito, descritto nei capitoli successivi.

#### **4.1 BREVE CRONISTORIA DELLE INDAGINI NEL SITO DI STUDIO**

Durante i mesi di novembre e dicembre 2005, la ditta Geo-Net s.r.l. (di seguito Geo-Net) ha pianificato ed eseguito due campagne di pre-investigazione ambientale nel sito oggetto di studio, nell'ambito di una trattativa per la compravendita dello stabilimento galvanotecnico "Ex Ot-Gal". In particolare, sono stati realizzati 10 sondaggi geognostici a carotaggio continuo ed installati 2 piezometri a tubo aperto tipo *Norton* per il monitoraggio della falda idrica. Le analisi chimiche effettuate su terreno e acque sotterranee presentavano alcuni superamenti delle concentrazioni ammissibili dal DM 471/99 (allora vigente) e pertanto veniva avviata la procedura di caratterizzazione del sito. Il 31 gennaio 2007 Geo-Net presentava il Piano della Caratterizzazione ai sensi del D.lgs. 152/2006 (che nel frattempo era entrato in vigore). Successivamente, nel 2010-2011, è stato eseguito sul sito un intervento di bonifica (*Pump and Treat*) della durata di un anno. Il proseguimento di questo intervento è stato poi sospeso per motivi di natura burocratica.

Di seguito sono elencate tutte le attività svolte nelle fasi di pre-investigazione e di caratterizzazione del sito:

- 12 sondaggi a carotaggio continuo;
- Realizzazione di 14 piezometri per il monitoraggio della falda idrica sotterranea (di cui 2 interni allo stabilimento, 8 esterni allo stabilimento ma interni al sito di studio, 4 esterni al sito di studio);
- 4 *Slug Test* per la valutazione della permeabilità dell'acquifero;
- Campionamento di terreni all'interno dello stabilimento galvanotecnico (12 trincee esplorative eseguite a mezzo di escavatore meccanico e 4 campionamenti ad infissione);
- Campionamento di terreni esterni allo stabilimento (8 campionamenti ad infissione);
- Analisi chimiche dei terreni campionati;
- Analisi chimiche delle acque sotterranee prelevate dai 14 piezometri;
- Analisi di rischio sito specifica

La Figura 4.1 mostra una planimetria del sito oggetto di studio con l'ubicazione di tutte le indagini eseguite durante la fase di pre-investigazione e caratterizzazione del sito, nonché l'ubicazione dell'impianto di bonifica *Pump and Treat* utilizzato nel 2010-2011.

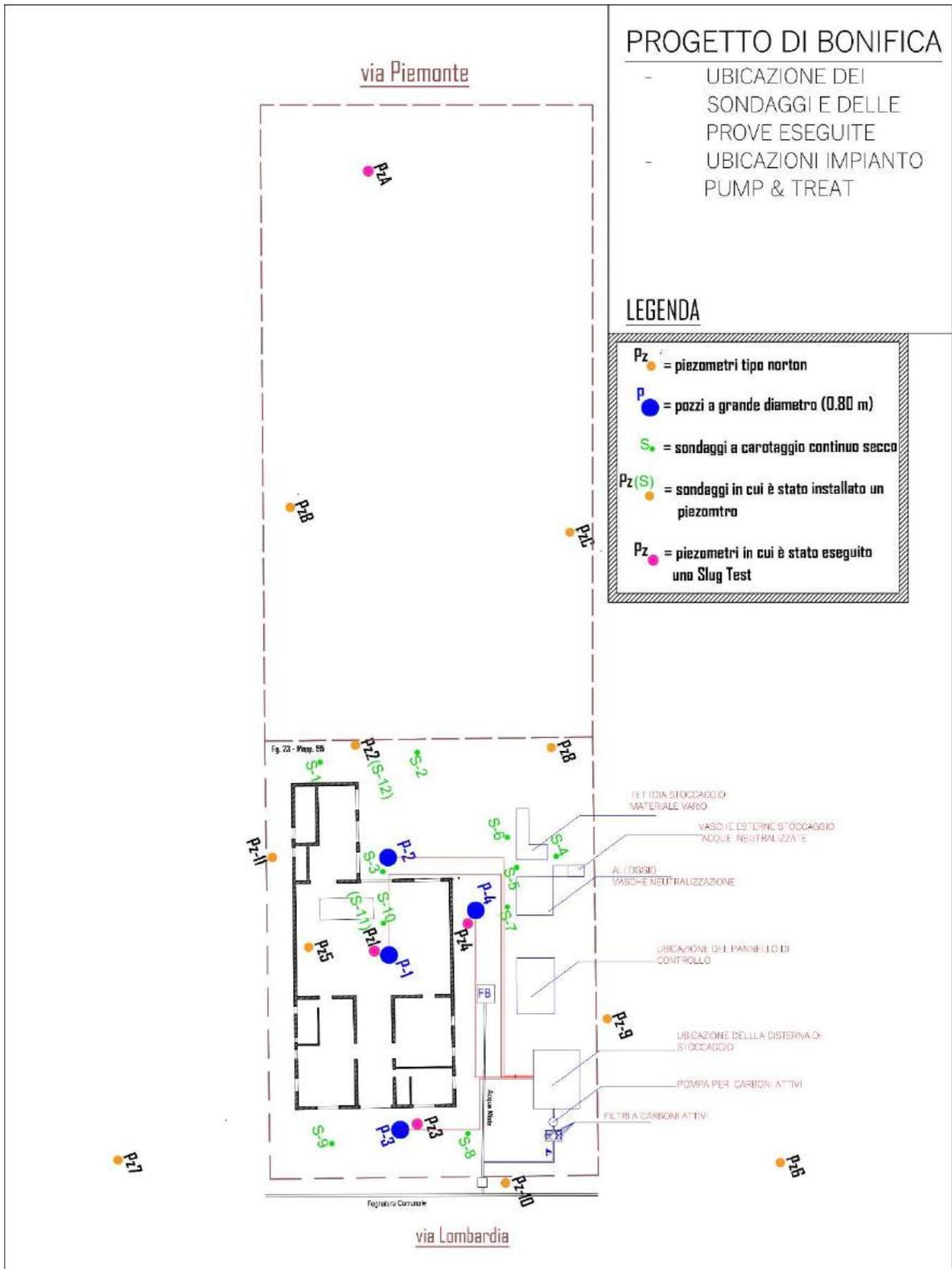


Figura 4.1: Planimetria del sito oggetto di studio (modificata da Geo-Net s.r.l., 2010) che mostra l'ubicazione delle indagini svolte tra il 2005 ed il 2010 e l'impianto Pump and Treat sfruttato durante la bonifica del 2010-2011.

## **4.2 SINTESI DELLE INDAGINI GEOLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE PREGRESSE**

In Figura 4.2 e 4.3 sono mostrate le stratigrafie di 2 tra i 12 sondaggi eseguiti da GeoNet tra il 2005 ed il 2007, tutte le altre stratigrafie sono mostrate nella sezione appendici. I 2 sondaggi selezionati si spingono rispettivamente ad una profondità di 8 e 10 metri dal p.c. ed evidenziano una marcata variabilità in termini sia stratigrafici che litologici. I sondaggi eseguiti tra il 2005 ed il 2007 sono stati utilizzati per la ricostruzione di alcuni profili stratigrafici (Figura 4.4), che mostrano la sovrapposizione di tre principali unità litologiche a geometria variabile. Le tre unità vengono di seguito descritte, a partire dal piano campagna (non considerando il primo spessore di materiale di riporto costituito da ghiaia eterometrica, laterizi e altro materiale di origine antropica):

- **Argilla limosa mediamente consistente (UNITÁ 1)**, di colore da grigio nocciola a marrone scuro fino a grigia, con presenza di calcinelli, tavola umida. Questa unità mostra spessori compresi tra 3 ed 8 m. Sono presenti intercalazioni a maggiore componente limosa e talvolta limoso sabbiose;
- **Sabbia limosa mediamente addensata (UNITÁ 2)**, a granulometria medio fine, di colore da grigio chiaro ad ocra. La presente litologia si trova intercalata allo strato sopra descritto e non è presente in tutti i punti indagati; il suo spessore è particolarmente sviluppato in corrispondenza dei piezometri Pz-3 (2,5 m) e di Pz-A (3,7 m). In Pz-A (Figura 4.3) escludendo le brevi intercalazioni di argilla al suo interno lo spessore raggiunge i 4.5 metri;
- **Argilla per nulla o debolmente limosa (UNITÁ 3)**, molto consistente di colore da grigio scuro a marrone scuro, asciutta, si rinviene a partire dalla base dello strato di argilla limosa fino alle massime profondità indagate (circa 10 m).

## 4.2.1 Sondaggi e sezioni geologiche

Riferimento: SONDAGGI AMBIENTALI EX STABILIMENTO OT-GAL										Sondaggio: S-11				
Località: OZZANO EMILIA (BO)										Quota:				
Impresa esecutrice: GEO-NET - Imola										Data: 28/11/2005				
Coordinate:										Redattore: geol. Tiziano Righini				
Perforazione: CAROTAGGIO CONTINUO SECCO														
Ø mm	R v	A r	S s	Pz	metri bot.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T. S.P.T. N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
													0,2	Preforo
													0,3	Soletta in calcestruzzo e materiale inerte stabilizzato (sottofondo pavimentazione)
													1,0	Mancato campionamento (materiale di riporto)
					1		1) Dis < 1,15 < 1,20							Limo argilloso nocciola con striature grigiastre da mediamente consistente a consistente.
					2		2) Dis < 2,15 < 2,20							Da 2,2 a 2,5 è presente un livello limoso sabbioso
					3		3) Dis < 3,15 < 3,20							Argilla limosa, colore nocciola con striature grigiastre, da poco a molto consistente (in profondità) presenza di concrezioni di ossidi di Mn e sporadici calcinelli di dimensioni da centimetriche a millimetriche
					4									
					5		4) Dis < 4,96 < 5,00							
					6									
					7								6,6	Limo sabbioso, colore nocciola con striature grigiastre, presenza di livelli centimetrici argilloso limosi mediamente consistenti, saturi
					8								7,7	Argilla bruno nocciola, molto consistente, asciutta
													8,2	

Figura 4.2: Stratigrafie di alcuni dei 12 sondaggi eseguiti dalla ditta Geo-Net s.r.l. tra il 2005 ed il 2007.

Riferimento: Piano delle indagini preliminari area retrostante il sito ex Ot-gal										Sondaggio: Pz-A			
Località: Ozzano dell'Emilia, via Piemonte										Quota:			
Impresa esecutrice: Geo-Net										Data: 01/02/2007			
Coordinate:										Redattore: Francesca Rispoli			
Perforazione: Carotaggio Continuo Secco													
Ø mm	R y	A r	Pz	metri ban.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T. S.P.T.	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
				0,1								0,1	Suolo vegetale con frammenti di piante
				1									Argilla consistente asciutta, di colore grigio-nocciola, con concrezioni calcaree maggiormente frequenti tra 1 e 2 m.
				2									
				3									
				4									
				4,4								4,4	Sabbia limosa grigia -nocciola, bagnata
				4,7								4,7	Argilla consistente asciutta, di colore grigio-nocciola
				5									
				5,2								5,2	Alternanza di sabbie limose e limi sabbiosi da umidi a bagnati di colore grigio nocciola
				6									
				7									
				8									
				9									
				8,9								8,9	Argilla consistente asciutta, di colore grigio-nocciola
				10								10,0	

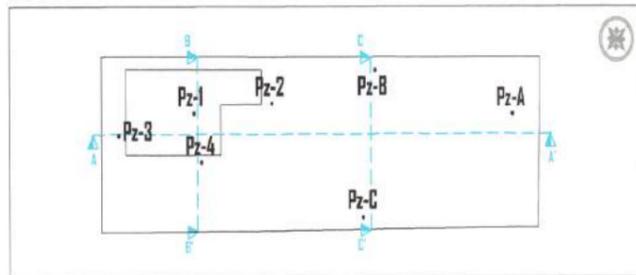
*Figura 4.3: Stratigrafie di alcuni dei 12 sondaggi eseguiti dalla ditta Geo-Net s.r.l. tra il 2005 ed il 2007*

# SEZIONI GEOLOGICHE

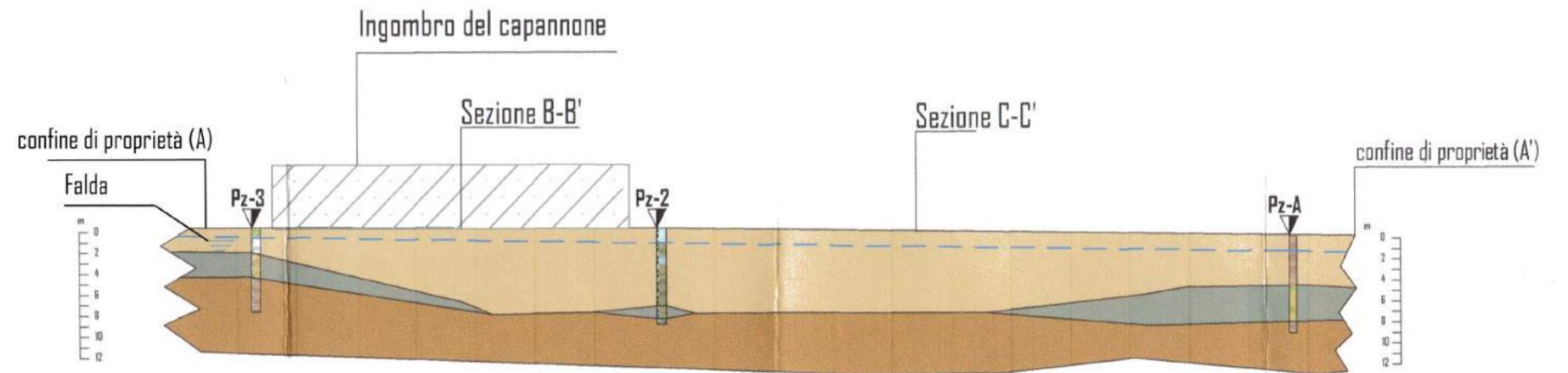
Legenda

	Argilla limosa talvolta sabbiosa, mediamente consistente (litotipi a minore permeabilità)
	Sabbia limosa e limo sabbioso mediamente addensati (litotipi a maggiore permeabilità)
	Argilla talvolta debolmente limosa consistente (acquiludo)

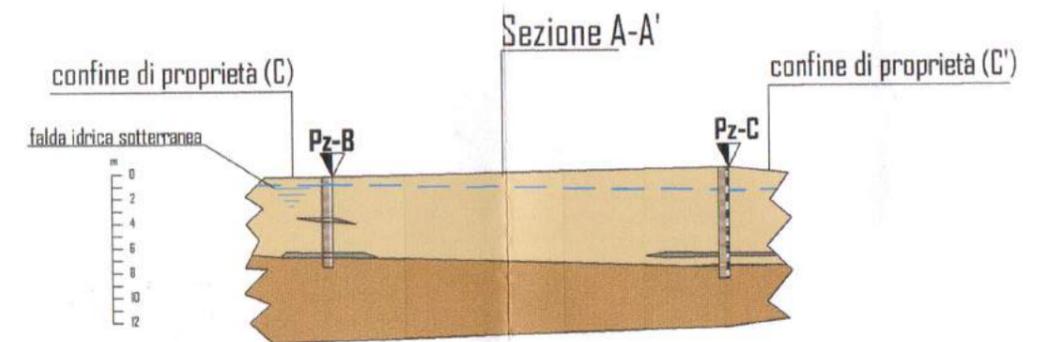
Ubicazione delle sezioni geologiche eseguite (scala 1:1000)



## SEZIONE A-A'



## SEZIONE C-C'



## SEZIONE B-B'

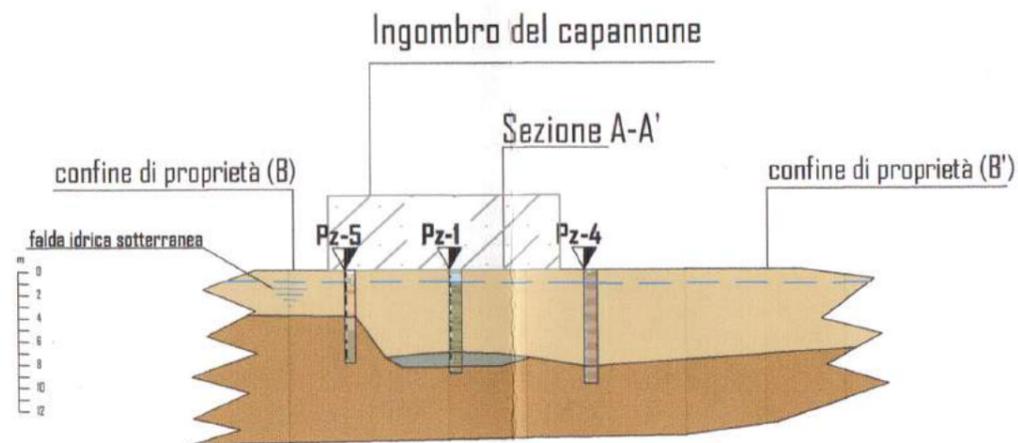


Figura 4.4: Sezioni geologiche ottenute dai vari sondaggi eseguiti (Geo-Net s.r.l., 2007)

#### 4.2.2 Slug test

Gli *slug test* sono test di campo relativamente semplici, da eseguirsi in foro piezometrico o pozzo, che permettono di determinare un valore di conducibilità idraulica rappresentativo dell'acquifero nelle immediate vicinanze del piezometro/pozzo. Durante il test viene perturbato in modo istantaneo il livello statico della falda (incremento, per aggiunta di un volume solido in foro noto come *slug* o decremento, per sottrazione di volume) e si monitorano poi le variazioni di livello che avvengono a seguito della perturbazione, fino al totale o quasi totale recupero del livello statico iniziale. L'interpretazione della curva di recupero del livello (es. tramite il metodo proposto da BOWER AND RICE, 1976) permette di ricavare alcune proprietà dell'acquifero, tra cui la conducibilità idraulica.

Nel sito di studio la conducibilità idraulica è stata stimata attraverso *slug test* in 4 piezometri. I risultati mostrano una marcata variabilità (fino a 3 ordini di grandezza):

- $5,43 \times 10^{-8}$  m/s in Pz1
- $2,94 \times 10^{-7}$  m/s in Pz4
- $1,65 \times 10^{-6}$  m/s in PzA
- $1,14 \times 10^{-5}$  m/s in Pz3

Tale diversificazione è conseguenza della variabilità litologica osservabile lungo il tratto filtrato (completo) dei piezometri in cui è stato eseguito il test. I tratti filtrati dei diversi piezometri intersecano infatti stratigrafie molto eterogenee (vedi ad es. Figura 4.2, 4.3 o appendice), risultando in valori di conducibilità idraulica “complessiva” molto diversificati. Partendo dal presupposto che, in caso di stratificazione orizzontale, la litologia a maggior conducibilità è quella che contribuisce maggiormente alle variazioni di carico misurate durante la prova, si è tentato di assegnare un valore di conducibilità rappresentativo alle diverse unità litologiche, basandosi sull'osservazione delle litologie prevalenti intersecate dai singoli piezometri testati. Una schematizzazione in “unità idrogeologiche” (unità caratterizzate da diversa conducibilità idraulica) è stata elaborata per il modello numerico a partire dai risultati degli *slug test* ed è descritta nel Paragrafo 3.1 (Cap. 5).

#### 4.2.3 Monitoraggio dei livelli piezometrici

In Tabella 4.5 vengono mostrati i valori di carico idraulico della falda acquifera ottenuti da campagne di monitoraggio a cadenza trimestrale effettuate durante l'anno in cui era attiva la bonifica del sito (2010-2011). I carichi sono stati misurati nei 14 piezometri realizzati per il monitoraggio della falda (Tabella 4.5), presentano una profondità compresa tra gli 8 e i 10 metri e sono completamente filtrati. Il primi valori misurati in data 29/09/2010 rappresentano le condizioni naturali dell'acquifero (valore bianco), mentre quelli successivi sono perturbati del pompaggio del *Pump and Treat*.

Sigla di captazione	CARICHI IDRAULICI (m s.l.m.)				
	29/09/2010 valore bianco	05/01/2011	13/05/2011	12/07/2011	29/09/2011
<b>Pz1</b>	45.30		43.90		41.30
<b>Pz2</b>	44.50		44.00		42.10
<b>Pz3</b>	45.40	45.40	44.10	43.99	43.33
<b>Pz4</b>		45.35	45.35	45.12	43.35
<b>Pz5</b>	44.40	45.00	42.00	42.02	41.90
<b>Pz6</b>		45.95	45.90	45.35	44.58
<b>Pz7</b>			45.20		45.01
<b>Pz8</b>	41.60	45.68	42.55	42.00	39.25
<b>Pz9</b>	45.32	45.60	45.20	44.90	44.32
<b>Pz10</b>	45.20	45.60	45.15	45.00	44.30
<b>Pz11</b>	45.25	45.80	45.55	45.50	45.00
<b>PzA</b>	44.70		45.60		44.70
<b>PzB</b>	45.00	45.95	45.50	45.12	44.08
<b>PzC</b>	43.70		39.75		44.40

Tabella 4.5: monitoraggio della falda acquifera durante la bonifica *Pump and Treat* eseguita nel 2010-2011 (Geo-Net s.r.l., 2011)

Nell'unica data di monitoraggio disponibile precedente all'accensione dell'impianto *Pump and Treat* (29/10/2010), escludendo i valori di Pz8 in quanto è stata verificata una non corretta installazione del piezometro, i carichi idraulici mostrano valori compresi tra 43.70 e 45.40 metri s.l.m. Successivamente all'accensione i carichi si attestano su valori minimi e massimi di 39.75 e 45.95 metri s.l.m rispettivamente.

La falda monitorata (che soggiace a profondità massime di 2.90 m da p.c.) è ospitata nelle Unità litologiche 1 e 2 (Cfr. Par. 4.2) ed è ricaricata quasi esclusivamente dalla percolazione di acque meteoriche. La falda è sostenuta dal substrato a permeabilità molto bassa costituito dall'Unità litologica 3 (Cfr. Par. 4.2).

### 4.3 VALORI TERMO-PLUVIOMETRICI CONSIDERATI

Di seguito vengono mostrati in Tabella 4.6 i valori termo-pluviometrici considerati per la stima dell'infiltrazione efficace. La procedura seguita per la stima dell'infiltrazione efficace è descritta nel Paragrafo 3.3 (Cap. 3)

OSSERVAZIONI TERMOMETRICHE MENSILI RELATIVE LA STAZIONE DI <u>CASTEL SAN PIETRO</u>												
ANNO	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
2014	6.40	8.30	10.90	14.60	17.40	22.10	23.10	23.10	19.10	16.80	12.00	5.90
2013	3.20	3.00	7.50	13.70	16.80	21.40	25.30	24.90	20.90	15.40	10.00	5.20
2012	2.80	1.10	12.10	13.00	17.60	24.20	26.60	26.80	20.10	15.70	10.90	2.40
2011	2.40	5.50	8.60	14.70	18.40	22.20	23.90	25.90	23.00	14.01	8.30	4.90
2010	1.30	4.60	8.60	13.40	18.90	21.80	25.50	23.30	18.70	12.80	9.60	3.80
2009	2.50	5.70	9.60	14.10	20.00	22.10	25.20	26.00	21.00	14.20	9.60	3.10
2008	5.20	5.80	9.50	12.90	17.30	22.40	25.10	25.20	19.40	16.30	9.80	4.10
2007	5.70	7.10	9.80	15.30	19.40	22.80	25.90	23.60	18.70	14.10	8.00	4.00
OSSERVAZIONI TERMOMETRICHE MENSILI RELATIVE LA STAZIONE DI <u>BOLOGNA URBANA</u>												
ANNO	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
2014	7.00	9.20	12.00	15.60	18.50	23.10	23.50	24.00	21.00	17.50	12.90	6.90
2013	4.40	4.20	8.30	14.80	17.60	22.40	26.30	25.40	21.70	16.10	10.50	6.70
2012	4.20	2.60	13.60	14.00	18.70	25.20	27.70	27.90	20.70	16.30	11.70	3.70
2011	3.30	6.90	9.90	16.30	19.60	23.10	24.50	27.10	23.70	14.90	9.60	6.70
2010	2.40	5.50	9.50	14.30		22.70	26.30	24.10	19.30	13.40	10.30	
2009	3.10	6.50	10.60	14.80	21.20	23.20	25.90	26.60	21.50	15.10	10.20	4.10
2008	6.50	7.40	10.70	14.00	18.50	23.00	25.80	26.00	19.80	17.00	10.60	4.90
2007	7.10	8.50	11.00	16.80	20.60	23.50	26.70	24.20	19.70	14.70	9.00	5.10
OSSERVAZIONI TERMOMETRICHE MENSILI RELATIVE LA STAZIONE DI <u>MEZZOLARA</u>												
ANNO	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
2014	5.90	7.80	10.70	14.60	17.30	21.80	22.60	22.70	19.20	16.90	11.70	5.70
2013	2.80	2.90	7.30	13.50	16.80	21.40	25.00	24.60			9.80	4.50
2012	1.70	0.10	11.10	12.80	17.40	23.60	25.90	26.20	20.30	15.30	10.40	1.90
2011	2.30	4.90	8.50	14.60	17.70	22.10	23.40	25.70	23.00	13.80	8.10	4.10
2010	0.80	4.10	8.00	13.20		21.50	25.00	23.10	18.50	12.80	9.60	
2009	2.40	4.80	8.90	13.80	19.70	21.60	24.60	25.70	20.90	14.00	9.50	2.30
2008	4.80	5.30	9.00	12.70	17.50	22.00	24.60	24.90	19.00	15.90	9.70	3.90
2007	5.00	6.50	9.60	15.10	19.10	22.40	25.10	23.40	18.70	13.80	7.30	3.10
OSSERVAZIONI PLUVIOETRICHE MENSILI RELATIVE LA STAZIONE DI <u>CASTEL SAN PIETRO</u>												
ANNO	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
2014	100.40	77.60	86.00	48.60	71.60	61.20	68.40	31.20	94.00	29.20	66.60	62.20
2013	88.00	123.00	123.60	70.20	88.60	41.20	13.80	54.00	31.60	105.40	110.00	14.60
2012	9.60	34.60	16.20	87.80	71.80	6.40	7.00	5.60	107.80	82.70	96.60	35.40
2011	39.40	37.40	98.20	11.60	60.80	68.40	90.20	0.60	14.80	67.00	21.80	25.00
2010	53.40	80.40	99.00	79.60	97.80	80.80	18.60	64.40	60.00	74.60	82.80	62.40
2009	67.40	48.40	80.00	88.20	37.80	29.00	54.60	13.20	26.00	100.20	61.60	72.20
2008	50.80	14.80	63.80	39.80	93.60	109.20	35.80	0.40	0.20			66.60
2007	10.80	38.00	120.20	21.80	40.20	56.20	15.00	27.60	52.40	127.60	9.70	40.40
OSSERVAZIONI PLUVIOETRICHE MENSILI RELATIVE LA STAZIONE DI <u>BOLOGNA URBANA</u>												
ANNO	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
2014	109.00	84.80	76.80	88.00	57.60	84.20	116.20	19.20	95.40	37.80	81.40	
2013	105.20	131.40	151.80	90.60	95.80	23.40	7.40	21.20	26.60	105.60	117.60	9.20
2012	11.40	95.60	8.20	82.00	92.40	19.20	0.60	2.00	92.80	87.80	92.80	45.80
2011	47.60	37.80	85.20	16.00	36.20	81.80	74.40		16.60	61.80	14.80	16.20
2010	55.80	98.00	98.00	68.60	92.00	99.00	40.00	67.80	66.60	81.80	82.00	64.30
2009	69.20	55.00	81.00	107.40	30.40	41.80	39.40	22.80	46.60	75.00	60.80	101.60
2008	47.80	17.00	54.20	30.80	133.20	87.80	39.40	10.00	30.40	24.00	179.60	92.80
2007	10.60	34.60	100.40	19.80	41.60	132.00	1.20	19.00	25.00	143.80		41.00
OSSERVAZIONI PLUVIOETRICHE MENSILI RELATIVE LA STAZIONE DI <u>MEZZOLARA</u>												
ANNO	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
2014	100.80	97.00	63.80	43.00	51.00	74.00	120.00	23.00	59.40	47.00	65.80	65.00
2013	63.60	109.00	125.40	61.40	84.80	32.60	17.40	59.80			96.40	8.80
2012	10.00	41.20	1.40	83.60	72.80	8.80	0.40	1.20	93.80	79.00	96.80	33.20
2011	34.80	38.60	76.80	10.60	37.40	49.80	53.40		29.00	47.60	31.20	21.00
2010	51.00	88.20	75.80	65.60	98.80	117.80	19.00	74.80	52.40	78.20	103.00	34.20
2009	49.40	49.40	70.80	101.60	35.20	40.40	30.40	15.00	35.00	70.00	71.60	70.20
2008	40.40	17.80	46.80	42.60	69.20	142.20		24.80	51.80	44.80	151.00	76.40
2007	21.80	41.20	105.60	23.40	45.40	73.60	15.00	18.00	60.60	103.60	16.80	46.00

Tabella 4.6: valori termo-pluviometrici considerati (ARPA., 2007-2014).

#### 4.4 CONTAMINAZIONE PRESSO IL SITO DI STUDIO

Le analisi chimiche effettuate negli anni 2005-2010, nelle 3 matrici ambientali considerate (suolo, suolo profondo, acqua sotterranea), hanno evidenziato i superamenti, all'interno e all'esterno del sito, di concentrazione delle CSC (soglia di concentrazione) imposta dal D.lgs. 152/2006 dei seguenti elementi/composti:

- Nichel: sia per acque sotterranee che per terreno superficiale/profondo (12.9 ÷ 422, µ/L);
- Organoalogenati (in particolare Tricloroetilene e 1,1 Dicloroetilene) nelle acque sotterranee. Il Tricloroetilene presenta valori compresi 3.71÷650 µ/L, mentre 1,1 Dicloroetilene 0.12÷24.2 µ/L.

In questo lavoro viene considerata esclusivamente la contaminazione rilevata nella matrice acqua sotterranea ed in particolare si pone attenzione su due composti organoclorurati rilevati in tale matrice: il Tricloroetilene (TCE) e 1,1-Dicloroetilene (1,1-DCE), la cui origine è indubbiamente legata all'attività industriale svolta in passato nello stabilimento ex Ot-Gal. I due composti sono stati selezionati come rappresentativi della contaminazione locale della falda, in quanto quelli ritenuti con il più alto grado di tossicità per la salute umana. In data 29/09/2010 è stato eseguito un campionamento della matrice acqua sotterranea nei 14 piezometri mostrati in Figura 4.1. I valori di concentrazione ottenuti in tale data (Tabelle 4.7-4.10) sono rappresentativi della condizione di pre-attivazione dell'impianto di *Pump and Treat* (valore bianco). Successivamente, dopo l'accensione dell'impianto in data 1/10/2010, è stato eseguito un campionamento della stessa matrice con cadenza trimestrale. I risultati vengono mostrati nelle Tabelle 4.7-4.10.

Per quanto riguarda i piezometri interni al sito, vengono considerati come valori limite di contaminazione le CSR ("Concentrazione Soglia di Rischio") derivanti da un'analisi di rischio sito-specifica (discussa più avanti in questo paragrafo); esternamente al sito i valori limite sono rappresentati dalle CSC ("Concentrazione Soglia di Contaminazione"), in accordo con quanto prescritto dal D.Lgs. 152/2006.

## Tricloroetilene (TCE)

Punto di prelievo	Unità di misura	Valore Limite CSR (rif. Progetto di bonifica)	Valore (bianco) 29/09/10	Valore (I Trim) 05/01/11	Valore (II Trim) 13/05/11	Valore (III Trim) 12/07/11	Valore (IV Trim) 29/09/11
PzA	µg/L	151	4,73		0,56		0,90
PzB	µg/L	151	6,3	1,13		1,04	
PzC	µg/L	151	25,2		11,3		8,0
Pz1	µg/L	151	<b>650</b>		<b>910</b>		<b>1440</b>
Pz2	µg/L	151	3,71		1,3		1,88
Pz3	µg/L	151	80	24,1		10,7	
Pz4	µg/L	151	24	3,16		1,31	
Pz5	µg/L	151	<b>258</b>	78		82	
Pz6	µg/L	151	9,4	0,477		0,52	
Pz7	µg/L	151	17,3		7,7		<0,04

Tabella 4.7: valori di Tricloroetilene rilevati nei piezometri interni al sito (Geo-Net s.r.l., 2011). Le caselle vuote indicano che non è stato ricercato il composto, mentre le caselle in giallo indicano un superamento delle CSR.

Punto di prelievo	Unità di misura	Valore Limite CSC (rif. Tab. 1 allegato 5 - D.gls 152/06)	Valore (bianco) 29/09/10	Valore (I Trim) 05/01/11	Valore (II Trim) 13/05/11	Valore (III Trim) 12/07/11	Valore (IV Trim) 29/09/11
Pz8	µg/L	1,5	<b>6,2</b>	0,81	<b>1,95</b>	<b>3,4</b>	<b>2,13</b>
Pz9	µg/L	1,5	<b>113</b>	<b>7,3</b>	<b>2,63</b>	<b>1,53</b>	<b>3,06</b>
Pz10	µg/L	1,5	<b>38,3</b>	<b>6,4</b>	0,334	0,71	<b>8,2</b>
Pz11	µg/L	1,5	<b>111</b>	<b>10</b>	<b>3,3</b>	0,76	0,444

Tabella 4.8: valori di Tricloroetilene rilevati nei piezometri esterni al sito (Geo-Net s.r.l., 2011). Le caselle vuote indicano che non è stato ricercato il composto, mentre le caselle in giallo indicano un superamento delle CSC.

## 1.1-Dicloroetilene (1.1-DCE)

Punto di prelievo	Unità di misura	Valore Limite CSR (rif. Progetto di bonifica)	Valore (bianco) 29/09/10	Valore (I Trim) 05/01/11	Valore (II Trim) 13/05/11	Valore (III Trim) 12/07/11	Valore (IV Trim) 29/09/11
PzA	µg/L	2,07	0,28		0,049		<0,04
PzB	µg/L	2,07	1,59	<0,04		0,044	
PzC	µg/L	2,07	<b>4,08</b>		0,30		0,37
Pz1	µg/L	2,07	<b>24,2</b>		<b>4,4</b>		<b>6,7</b>
Pz2	µg/L	2,07	0,44		0,18		0,28
Pz3	µg/L	2,07	<b>2,73</b>	0,26		0,42	
Pz4	µg/L	2,07	1,54	0,121		<0,04	
Pz5	µg/L	2,07	<b>7,2</b>	1,42		1,22	
Pz6	µg/L	2,07	<0,04	<0,04		<0,04	
Pz7	µg/L	2,07	<0,04		<0,04		<0,04

Tabella 4.9: valori di 1.1 Dicloroetilene rilevati nei piezometri interni al sito (Geo-Net s.r.l., 2011). Le caselle vuote indicano che non è stato ricercato il composto, mentre le caselle in giallo indicano un superamento delle CSR.

Punto di prelievo	Unità di misura	Valore Limite CSC (rif. Tab. 1 allegato 5 - D.gls 152/06)	Valore (bianco) 29/09/10	Valore (I Trim) 05/01/11	Valore (II Trim) 13/05/11	Valore (III Trim) 12/07/11	Valore (IV Trim) 29/09/11
Pz8	µg/L	0,05	<b>0,12</b>	<0,04	<b>0,39</b>	<b>0,32</b>	<b>0,37</b>
Pz9	µg/L	0,05	<b>9,1</b>	<0,04	<0,04	<0,04	<b>0,068</b>
Pz10	µg/L	0,05	<b>3,19</b>	<b>0,28</b>	<0,04	<0,04	<b>0,58</b>
Pz11	µg/L	0,05	<b>0,23</b>	<b>0,134</b>	<0,04	<0,04	<0,04

Tabella 4.10: valori di 1.1 Dicloroetilene rilevati nei piezometri esterni al sito (Geo-Net s.r.l., 2011). Le caselle vuote indicano che non è stato ricercato il composto, mentre le caselle in giallo indicano un superamento delle CSC

Un'analisi di rischio sito-specifica è stata effettuata da GeoNet nell'anno 2008 ed ha permesso di accertare che il sito risulta adatto ad un utilizzo di tipo industriale produttivo, in quanto la presenza di contaminanti in falda, nel suolo superficiale e nel suolo profondo non

risulta in nessun modo potenzialmente dannosa per la salute di eventuali lavoratori (Geo-Net s.r.l., 2008)

L'utilizzo residenziale, invece, è risultato subordinato al raggiungimento delle CSR calcolate per i contaminanti TCE e 1,1 DCE in falda (Tabella 4.11).

<i>CSR calcolate per i contaminanti presenti in sito</i>			
	<b>Suolo</b>	<b>Falda</b>	<b>Concentrazione (CSR)</b>
<b>1,1 dicloroetilene</b>		X	2.07 µg/l
<b>Tricloroetilene</b>		X	151 µg/l

Tabella 4.11: valori delle concentrazioni soglia di rischio (CSR) calcolati rispettivamente per TCE e 1.1-DCE (Geo-Net s.r.l., 2008).

È bene infine sottolineare che, in termini generali, le informazioni riguardanti la contaminazione rinvenuta nel sito oggetto di studio sono spesso scarse o assenti. Tra le limitazioni principali: non si conosce la data di inizio della contaminazione; non è nota l'attività specifica che ha causato direttamente o indirettamente la contaminazione e, di conseguenza, è ignota la posizione precisa della sorgente di contaminazione; non è nota l'entità dello sversamento né se la sorgente sia da considerare ancora attiva; non sono stati effettuati monitoraggi successivi o antecedenti rispetto a quello del primo anno di bonifica qui mostrato.

#### **4.5 BONIFICA ED IMPIANTO PUMP AND TREAT**

Gli obiettivi della bonifica della falda idrica sotterranea, già iniziata nel 2010-2011 e successivamente interrotta, prevedono:

- L'abbassamento delle concentrazioni di TCE e 1.1-DCE entro le CSR calcolate tramite analisi di rischio (rispettivamente pari a 151 µg/l e 2,07 µg/l), all'interno dei confini del sito.
- L'abbassamento delle concentrazioni di organoalogenati entro i valori delle CSC previste dal D. Lgs. 152/2006 all'esterno del sito.

L'originale piano di bonifica del sito prevedeva:

- emungimento delle acque di falda (con tecnica *Pump & Treat*) da pozzi a grande diametro, filtrazione e scarico in fogna, per il periodo di un anno;

- Valutazione degli effetti dopo 12 mesi di attività di bonifica (1° anno) e presentazione di un progetto integrativo che indicasse/giustificasse la eventuale interruzione o il proseguimento della bonifica per *Pump & Treat* e/o la eventuale aggiunta/modifica di attività integrative (iniezioni in falda per stimolare la degradazione per dealogenazione microbica riduttiva) ed indicazione delle nuove tempistiche.

Di seguito sono elencate le date dei principali interventi della prima fase di bonifica realizzata nel 2010-2011;

18/08/2010 -- Ripulitura del sito e rimozione della sorgente di contaminazione (*dig and dump*);

29/09/2010 – Monitoraggio dei livelli piezometrici e delle concentrazioni riguardanti i solventi clorurati prima di azionare l'impianto di bonifica (valori di bianco);

1/10/2010 -- Accensione dell'impianto di bonifica *Pump & Treat*;

29/09/2011 -- Spegnimento dell'impianto dopo un anno di esercizio ed interruzione della procedura di bonifica per problemi di natura burocratica.

In base ai risultati di monitoraggio delle concentrazioni di TCE e 1.1-DCE (riportate nelle Tabelle 4.7-4.10) si osserva che dopo un anno dall'accensione dell'impianto:

- le concentrazioni di 1,1-Dicloroetilene sono risultate inferiori al 50% rispetto a quelle iniziali, per tutti i piezometri interni al sito ad eccezione del Pz2;
- le concentrazioni di Tricloroetilene sono risultate inferiori al 50% rispetto a quelle iniziali, per tutti i piezometri interni al sito ad eccezione del Pz1 e del Pz2;
- In generale il trend osservato indica una generale diminuzione delle concentrazioni dei composti monitorati nelle acque di falda ed, in alcuni piezometri, esse risultano già inferiori ai limiti previsti dagli obiettivi di bonifica.

La prima fase di bonifica ha quindi mostrato una generale efficacia della tecnica selezionata per l'abbattimento delle concentrazioni di TCE e 1.1-DCE, seppure gli obiettivi di bonifica non siano stati completamente raggiunti entro il primo anno di attività. Il modello numerico sviluppato nel presente lavoro permetterà, tra il resto, di valutare i tempi necessari affinché l'impianto *Pump and Treat* (integrato nel modello con impianto di condizionamento geotermico) porti al raggiungimento degli obiettivi di bonifica fissati per TCE e 1.1-DCE.

L'ipotetico impianto *Pump and Treat* considerato per la prossima fase di bonifica è analogo a quello già utilizzato per la fase di bonifica precedente (2010-2011). Il sistema è composto da punti di emungimento (pozzi di estrazione) ed un sistema di stoccaggio trattamento e scarico delle acque in superficie. Nella Figura 4.1 viene riportata una schematizzazione del sistema *Pump and Treat* nel sito.

Di seguito sono descritte alcune delle componenti principali, già installate nel 2010-2011:

### **Pozzi di estrazione e pompe di estrazione**

Sono stati installati 4 pozzi di estrazione dal diametro di circa 80 cm fino alla profondità di circa 9 m da p.c., localizzati in Figura 4.1. La profondità di perforazione dei pozzi permette di raggiungere lo strato argilloso impermeabile presente sul fondo della falda (è necessario raggiungere il fondo dell'acquifero in quanto i composti solventi clorurati in fase DNAPL, avendo una densità più elevata di quella dell'acqua, tendono a migrare verso il fondo dell'acquifero). Le pompe sono elettricamente collegate al pannello di controllo che, oltre a fornire corrente elettrica, ne gestisce il funzionamento. Le portate di esercizio complessive dell'intero impianto sono comprese tra 1 e 3 l/s.

### **Tubi di mandata e trincee**

Le tubazioni di mandata (tubazioni in speciale PCV flessibile da 2" o 50mm circa) collegano le pompe ad immersione installate nei pozzi di emungimento fino alla cisterna di stoccaggio.

### **Cisterna di stoccaggio**

Quando azionate dal pannello di controllo ed in presenza di acqua di falda nei singoli pozzi, le 4 pompe sommerse, in modo indipendente fra loro, rilanciano le acque emunte dai pozzi verso una cisterna di stoccaggio dal volume di circa 5 m<sup>3</sup>, attraverso le tubazioni di mandata. Internamente alla cisterna sono presenti due interruttori di livello che, collegati al pannello di controllo, interromperanno l'azione delle pompe in caso di superamento del livello massimo di guardia.

### **Sistema di filtraggio**

L'acqua contaminata contenuta nella cisterna di stoccaggio viene trasferita verso i 4 filtri a carboni attivi granulari (GAC1, GAC2, GAC3 e GAC4; dove "GAC" sta per *Granular Activated Carbon*) a mezzo di pompa sommersa. I 4 filtri, dal volume di 200 litri ciascuno, sono dotati di valvole a sfera manuali di apertura/chiusura e regolazione del flusso a monte e a valle, così da risultare indipendenti fra loro. Le valvole permettono di escludere uno o più filtri contemporaneamente, garantendo la funzionalità del sistema anche durante le operazioni di manutenzione e/o sostituzione dei carboni attivi saturi. Lungo ogni linea di scarico è presente un punto di campionamento per le acque di scarico.

### **Stima del consumo dei carboni attivi**

I 4 filtri a carboni attivi da progetto hanno un volume interno di 200 litri ciascuno e possono contenere circa 100 kg di carbone ciascuno. L'assorbimento nominale di solventi clorurati

del carbone attivo che si intende utilizzare è del 15% in peso, ovvero 15 kg per ogni filtro. Nella conservativa ipotesi di:

- un carico organico teorico di 2 mg/l;
- una portata media di 1 l/s (applicata durante la bonifica del 2010-2011);

È stato previsto un carico organico medio giornaliero di circa 0,2 kg e quindi una longevità media di circa 80gg per ogni filtro, prima di arrivare a saturazione dei carboni.

### **Scarico in pubblica fognatura e in corpi idrici superficiali**

Le acque in uscita dai filtri vengono convogliate in un'unica linea di scarico e conferite in impianto fognario, nel rispetto della portata massima di 3 l/s e dei limiti allo scarico. In particolare, i valori limite di emissione in fognatura per Solventi Clorurati è 2 mg/l (Tab. 3, All. 5, parte III, D.lgs 152/2006), mentre le CSC nelle acque sotterranee per i due composti organoalogenati qui considerati sono rispettivamente: 1.5 µg/l (TCE) e 0.05 µg/l (1.1-DCE) (Tab. 2, All. 5, parte III, D.lgs 152/2006).

Immediatamente a valle dello scarico dell'impianto di *Pump and Treat* e a monte dell'immissione in pubblica fognatura, è stato predisposto un apposito pozzetto ispezionabile all'interno del quale è stato installato un apposito contatore per la misura dei quantitativi immessi in fognatura. Con cadenza mensile, sono da prelevare ed analizzare un campione a monte ed uno a valle dei filtri, al fine di:

- valutare l'effettiva efficienza dei filtri a carboni attivi
- garantire all'ente gestore degli impianti fognari il rispetto dei parametri di concentrazione (sopra riportati) previsti dal D.Lgs. 152/06

## **5. ELABORAZIONE DEI DATI**

## 5.1 INTERPOLAZIONI

### 5.1.1 Interpolazione dei carichi piezometrici

Attraverso l'utilizzo del software *Surfer* è stato possibile interpolare i valori piezometrici puntuali per determinare l'andamento della falda superficiale indagata. I valori considerati risalgono al 29/09/2010 (valore "bianco" precedente all'attivazione del *Pump and Treat*; Tabella 4.5), in modo da ottenere una distribuzione piezometrica non disturbata dal pompaggio. Il metodo di interpolazione adottato è quello della minima curvatura (Cfr. Par 3.2). La piezometria ottenuta (Figura 5.1) è stata poi utilizzata come base per la ricostruzione della falda nel modello numerico. Per i fini della modellazione è importante individuare un andamento piezometrico il più possibile regolare, al limite semplificato (escludendo quindi variazioni di flusso secondarie localizzate), in modo da poterlo riprodurre numericamente tramite l'applicazione di condizioni al contorno relativamente semplici.

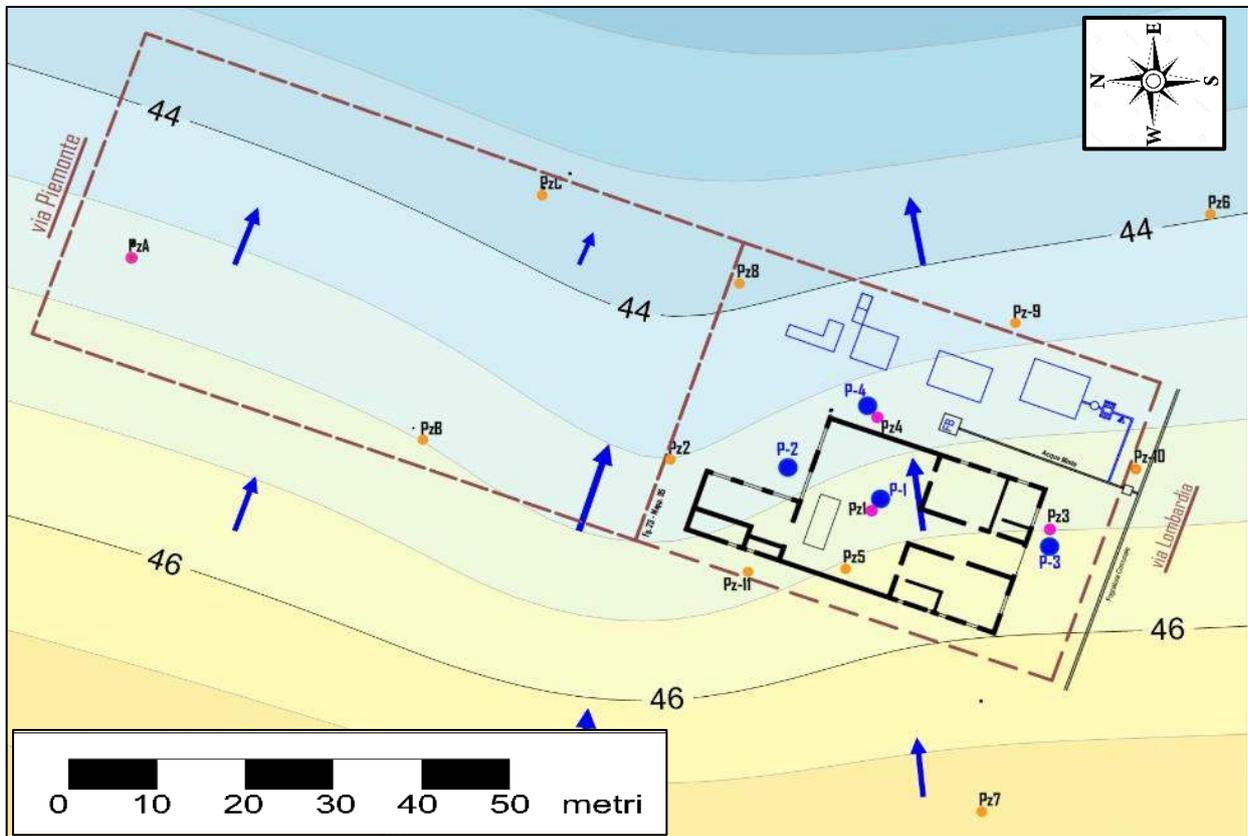


Figura 5.1: modello idrogeologico dell'area oggetto di studio ottenuto dall'interpolazione dei valori rilevati nella fase di pre-attivazione dell'impianto di bonifica. Le isolinee sono spaziate con un intervallo di 0.5 metri.

Per questo motivo, alcuni piezometri che mostravano accentuate variazioni di carico molto localizzate, o che erano relativamente distanti dall'area di interesse, sono stati esclusi dall'interpolazione. Ricordando che la quota locale del piano campagna è pari a 46.6 metri,

la piezometria ottenuta mostra una soggiacenza compresa tra i 3.1 metri a valle flusso e 0.60 metri a monte. Fatte salve eventuali variazioni stagionali, la direzione principale di flusso ottenuta è circa Ovest – Est ed il gradiente medio della falda è pari a 0.03.

### **5.1.2 Interpolazione delle concentrazioni di contaminanti**

Nelle Figure 5.2 e 5.3 vengono mostrate le mappe di isoconcentrazione del Tricloroetilene e del 1.1-Dicloroetilene, ottenute tramite interpolazione dei dati di monitoraggio puntuali rilevati in data 29/09/2010, precedentemente all'attivazione della bonifica (Tabelle 4.7-4.10). Il metodo di interpolazione usato in questo caso è il kriging (Cfr. Par 3.2). L'isolinea di colore verde presente in Figura 5.2 rappresenta il valore di CSC del TCE (1.5 µg/L), mentre le isolinee di colore rosso presenti in entrambe le Figure 5.2 e 5.3 corrispondono ai valori delle CSR (151 µg/L per il TCE e 2.07 µg/L per l'1-1 DCE). Dalle due mappe è possibile fare tre considerazioni:

- Il focolaio della contaminazione della falda idrica sotterranea del sito sembra ubicato in corrispondenza di una canalina di scolo delle acque di processo, situata al centro dello stabilimento in prossimità del piezometro Pz-1. Questa area verrà quindi assunta come “sorgente di contaminazione” in sede di modellazione del trasporto dei contaminanti;
- Il pennacchio della contaminazione mostra uno sviluppo longitudinale e trasversale sufficientemente contenuto (lunghezza e larghezza massime di 70 e 50 metri, rispettivamente), probabilmente a causa della scarsa conducibilità idraulica dei terreni attraversati;
- La direzione principale di migrazione dei plume è circa Ovest-Est, in accordo con la direzione di flusso mostrata precedentemente nella mappa delle isopieze (Figura 5.1)

Le distribuzioni di concentrazione di TCE e 1.1-DCE ottenute tramite le interpolazioni sono state sfruttate in sede di modellazione del trasporto, sia per la definizione della posizione della sorgente di contaminazione, sia per la stima dei parametri di trasporto più appropriati alla riproduzione numerica dei plumes.

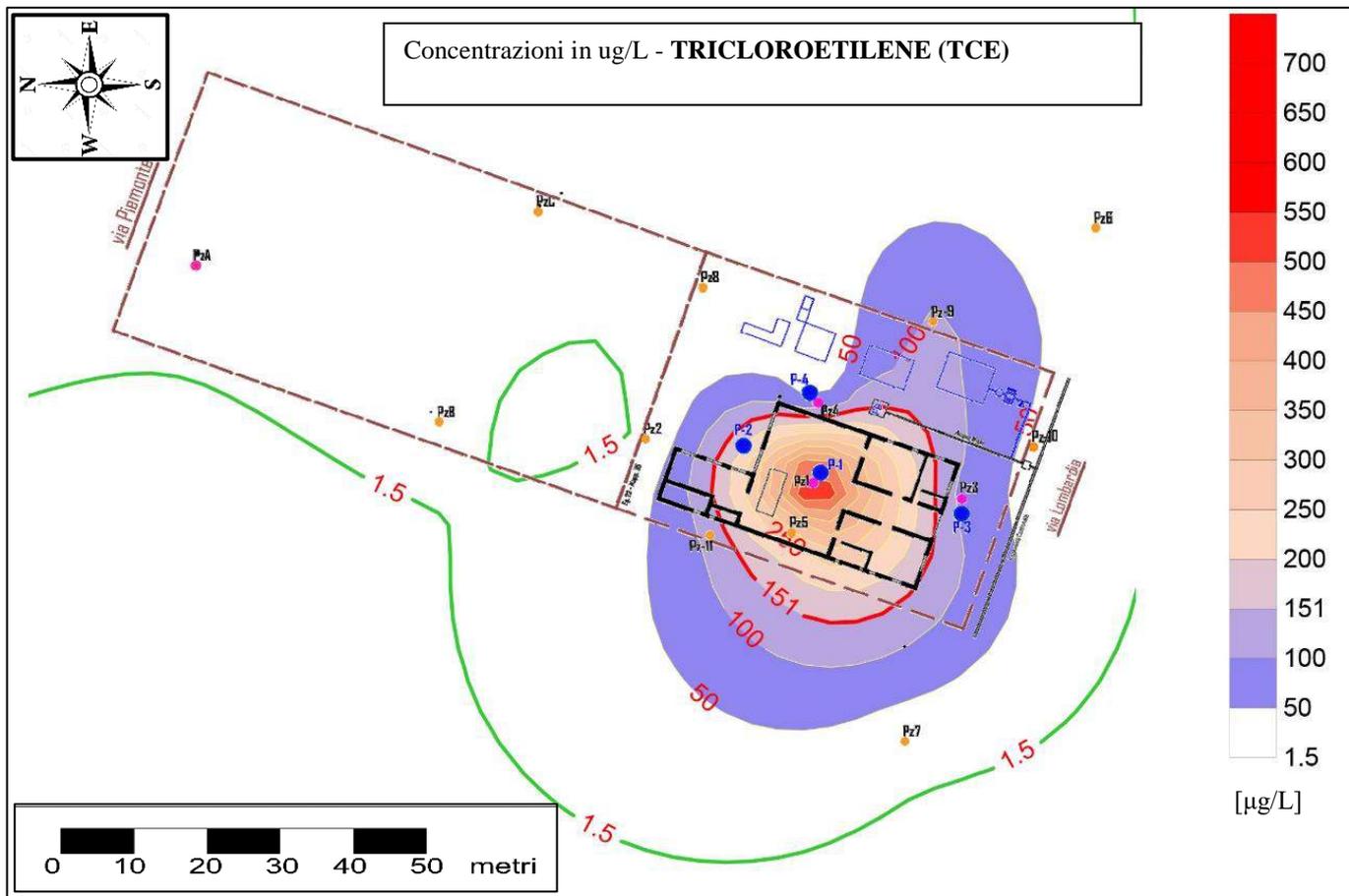
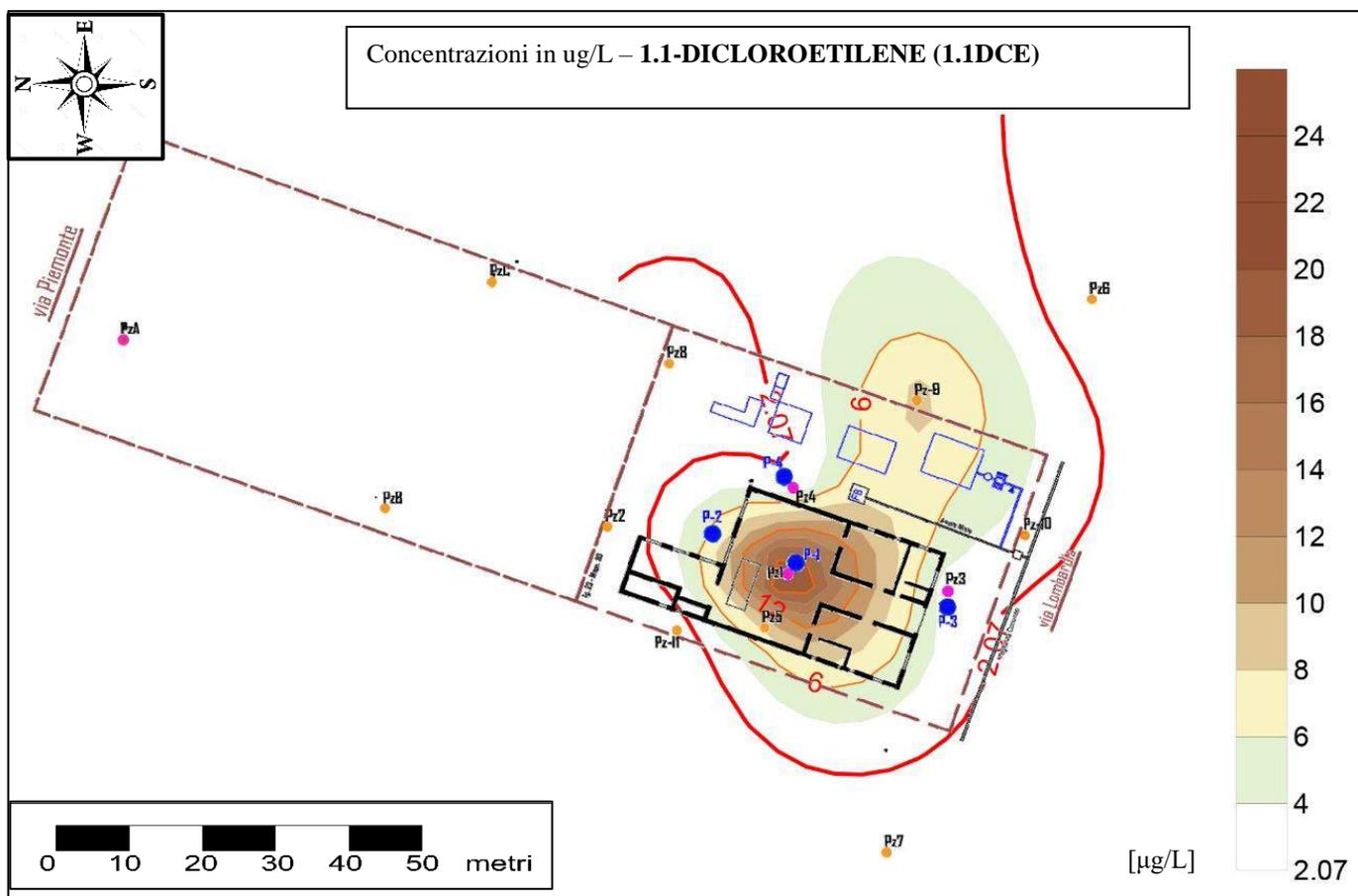


Figura 5.2: mappa delle isoconcentrazioni del Tricloroetilene nella falda idrica sotterranea.



## 5.2 STIMA DELLA RICARICA

In Tabella 5.4 sono riportate le temperature e precipitazioni medie mensili, ottenute mediando tra loro i valori provenienti dalle tre stazioni termo-pluviometriche della rete ARPA più vicine al sito oggetto di studio (Bologna urbana, Castel San Pietro, Mezzolara, mostrati in Tabella 4.6).

Dalla media delle osservazioni delle tre stazioni termo-pluviometriche è stato possibile determinare i valori di evapotraspirazione, di precipitazione efficace e di infiltrazione efficace, secondo le metodologie descritte nel Paragrafo 3 (Cap. 3). I risultati sono mostrati in Figura 5.4.

Per i fini della modellazione numerica del flusso, è stato considerato il valore annuale di infiltrazione efficace pari a 164 mm/anno, applicato come condizione al contorno di ricarica.

MEDIA DELLE OSSERVAZIONI TERMOMETRICHE E PLUVIOMETRICHE RIGUARDANTI TRE STAZIONI: BOLOGNA URBANA -- CASTEL SAN PIETRO -- MEZZOLARA													
	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	TOT (mm/anno)
OSS. TERMOMETRICHE (°C)	3.88	5.35	9.80	14.28	18.47	22.57	25.15	25.02	20.29	15.06	9.96	4.42	
OSS. PLUVIOMETRICHE (mm/mese)	52.01	62.12	79.54	57.61	68.17	65.03	38.09	26.24	50.97	76.06	77.70	48.23	701.76
EVAPOTRASPIRAZIONE (mm/mese)	3.16	5.21	13.48	24.31	36.40	49.85	59.07	58.60	42.18	26.44	13.83	3.87	336.39
PRECIPITAZIONE EFFICACE (mm/mese)	48.85	56.91	66.06	33.30	31.77	15.18	-20.98	-32.36	8.80	49.62	63.87	44.36	365.38
<b>INFILTRAZIONE EFFICACE (mm/mese)</b>	<b>21.98</b>	<b>25.61</b>	<b>29.73</b>	<b>14.99</b>	<b>14.30</b>	<b>6.83</b>	<b>-9.44</b>	<b>-14.56</b>	<b>3.96</b>	<b>22.33</b>	<b>28.74</b>	<b>19.96</b>	<b>164.42</b>

Tabella 5.4: tabella riassuntiva con tutti i valori elaborati e calcolati. Evidenziato in rosso il valore di infiltrazione efficace annuale utilizzato nei modelli numerici di flusso.

## 5.3 MODELLAZIONE NUMERICA

Per simulare numericamente l'impianto integrato (geotermico e di bonifica) oggetto di studio e la sua interazione con il flusso e la contaminazione della falda, si è proceduti per step successivi a complessità crescente:

1. Modello stazionario di flusso e trasporto: questo ha permesso una prima valutazione della correttezza dei dati implementati e del modello idrogeologico concettuale di base, nonché una prima analisi idrogeologica. In particolare, il modello ha fornito elementi utili a valutare:
  - Il posizionamento dei pozzi di estrazione e immissione;
  - Le portate ottimali dei pozzi;
  - La presenza di fenomeni di corto-circuitazione termica, tramite la ricostruzione dei percorsi di flusso con il codice MODPATH (considerando le assunzioni descritte nel Par 4.3 (Cap. 3));
2. Modello transitorio di flusso e trasporto "semplificato": nel modello stazionario sviluppato in precedenza è stata integrata la dimensione tempo, in modo da ottenere simulazioni il più possibile rappresentative della realtà fisica investigata. Il modello è definito come "semplificato" poiché è stato adottato uno schema temporale di pompaggio dei pozzi adatto a simulare un impianto di *Pump and Treat* tradizionale (Cfr. Par 5.3.7). In particolare, il modello ha fornito elementi utili per affinare le

condizioni al contorno di trasporto (ovvero i valori di concentrazione da applicare alla zona sorgente e la loro evoluzione nel tempo);

3. Modello transitorio di flusso e trasporto “complesso”: quest’ultimo rappresenta la simulazione finale dell’impianto integrato di climatizzazione e bonifica. Per la costruzione di questo modello sono stati sfruttati tutti gli elementi definiti con i modelli precedenti (es. posizione e portate dei pozzi, condizioni al contorno per la simulazione della sorgente di contaminazione e sua evoluzione nel tempo). A differenza del modello “semplificato”, è stato qui applicato uno schema di pompaggio/immissione opportuno alla simulazione dell’impianto integrato (Cfr Par 5.3.8).

Tutti i modelli realizzati hanno i seguenti elementi e parametri in comune:

- Discretizzazione del dominio e creazione della griglia
- Numero di layer e valori di conducibilità associati;
- Condizioni di carico costante;
- Condizione di ricarica efficace;
- Dispersione;
- Coefficienti di diffusione molecolare;
- Coefficienti di partizione (adsorbimento dei contaminanti)

Le uniche condizioni che variano tra i tre step di modellazione successivi sono:

- Modalità di simulazione della sorgente di contaminazione (condizioni al contorno di trasporto);
- Schemi temporali di pompaggio/immissione dei pozzi.

Nei paragrafi seguenti sono descritti i vari elementi dei modelli realizzati, e le modalità di implementazione degli stessi. I risultati (output) ottenuti dai modelli saranno invece mostrati e discussi dettagliatamente nel Capitolo 6.

### **5.3.1 Discretizzazione del dominio e creazione della griglia**

Il codice di calcolo MODFLOW richiede la discretizzazione del dominio fisico tridimensionale attraverso la creazione di una griglia composta da righe e colonne sul piano orizzontale, ed una serie di strati continui (layers) nella dimensione verticale. Per l’area oggetto di studio è stata realizzata una griglia di estensione 350x250 metri sul piano orizzontale. La griglia è caratterizzata da 142 righe e 215 colonne di dimensione variabile. In particolare, righe e colonne sono state “raffittite” nell’area centrale del dominio di modellazione (la più significativa ai fini dello studio) ottenendo delle celle di 1x1 metri (Figura 5.5). Il dominio di modellazione è stato orientato per comodità secondo la direzione di flusso della falda determinata precedentemente (Figura 5.1).

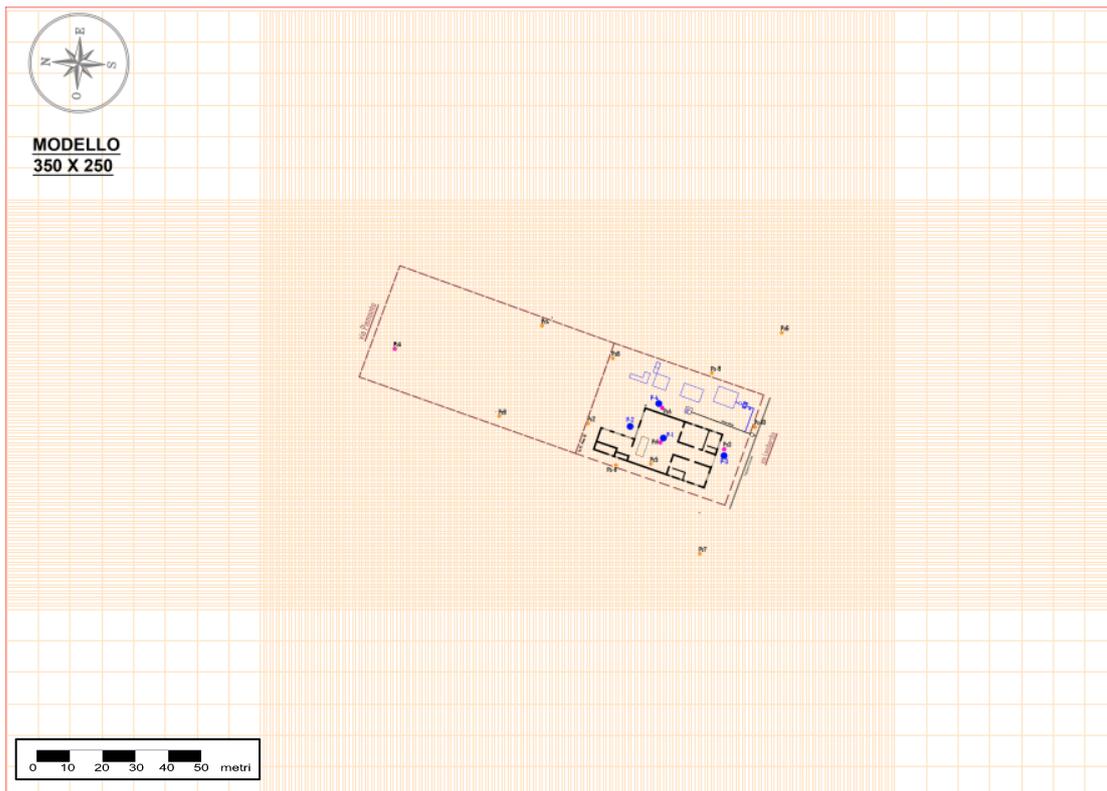


Figura 5.5: discretizzazione del dominio fisico. Modello di dimensioni 350x250 metri suddiviso in 215 colonne e 142 righe.

Per quanto riguarda la discretizzazione verticale in layers, ci si è basati sulle informazioni geologiche ed idrogeologiche descritte nel Paragrafo 2 (Cap. 4). In particolare, il modello geologico dell'area è stato semplificato per gli scopi della modellazione, suddividendo il sottosuolo in due layer di spessore e conducibilità idraulica costanti, come mostrato in Figura 5.6. Il layer 1 rappresenta l'Unità litologica 1 (Cfr. Par 2; Cap. 4) e gli è stato assegnato uno spessore costante di 7 m (tra 46.6 e 39.6 metri s.l.m.).

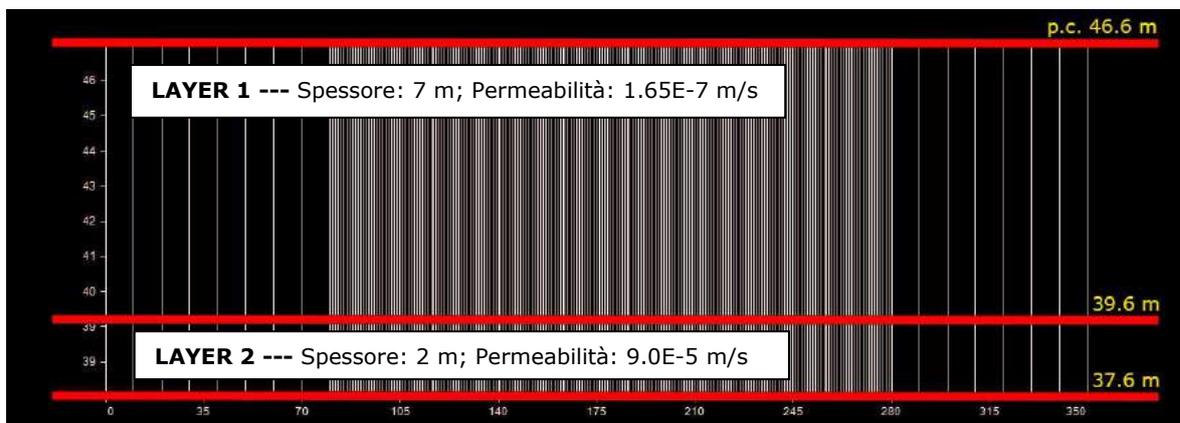


Figura 5.6: discretizzazione in layer e relativi valori di conducibilità idraulica assegnati

A questo layer è stata assegnata una conducibilità idraulica di  $1.65E-7$  m/s, sulla base delle interpretazioni dei risultati degli slug test. Il layer 2 rappresenta l'Unità litologica 2 è collocato tra le quote di 39.6 e 37.6 metri s.l.m. (spessore costante di 2 m). A questo layer è stato assegnato un valore di conducibilità idraulica pari a  $9.0E-5$  m/s. La quota di 37.6 m s.l.m. (base del layer 2) corrisponde anche alla base del modello. La sottostante Unità litologica 3, infatti, non è stata inclusa nel dominio di modellazione poiché si ritiene che questa non contribuisca al flusso di falda, ma rappresenti piuttosto la base semi-impermeabile su cui la falda superficiale oggetto della simulazione si imposta. Come già discusso nel Paragrafo 2.2 (Cap. 4), è importante ribadire che i valori di conducibilità restituiti dagli slug test effettuati nella fase di caratterizzazione del sito non sono rappresentativi delle singole unità litologiche individuate, ma restituiscono il valore complessivo di conducibilità idraulica derivante da una combinazione di tutte le unità attraversate dal piezometro (a causa della filtratura totale del tubo piezometrico). I valori attribuiti ai due layers del modello derivano pertanto da un'interpretazione dei risultati delle singole prove in relazione alla stratigrafia dei singoli punti di indagine.

### **5.3.2 Carico Costante e Ricarica**

Per simulare la piezometria mostrata nel Paragrafo 5.1.1, sono stati applicati due valori di carico idraulico costante (CHD) a monte e a valle idrogeologico dell'area di interesse, implementati con le geometrie mostrate in Figura 5.7. Le due condizioni di carico idraulico sono rispettivamente pari a 48.4 m s.l.m. a monte idrogeologico e 40 m s.l.m. a valle idrogeologico. Queste condizioni sono state applicate analogamente ad entrambi i layer, poiché, data l'assenza di uno spessore confinante tra le due unità simulate, si suppone che i carichi entro le 2 unità si equilibrino tra loro.

Il valore di ricarica applicato per simulare l'infiltrazione efficace è pari 164 mm/anno, come già discusso nel Paragrafo 5.2. Questa condizione è stata applicata al layer più superficiale del modello (layer 1), poiché l'infiltrazione efficace agisce a partire dalla superficie topografica.

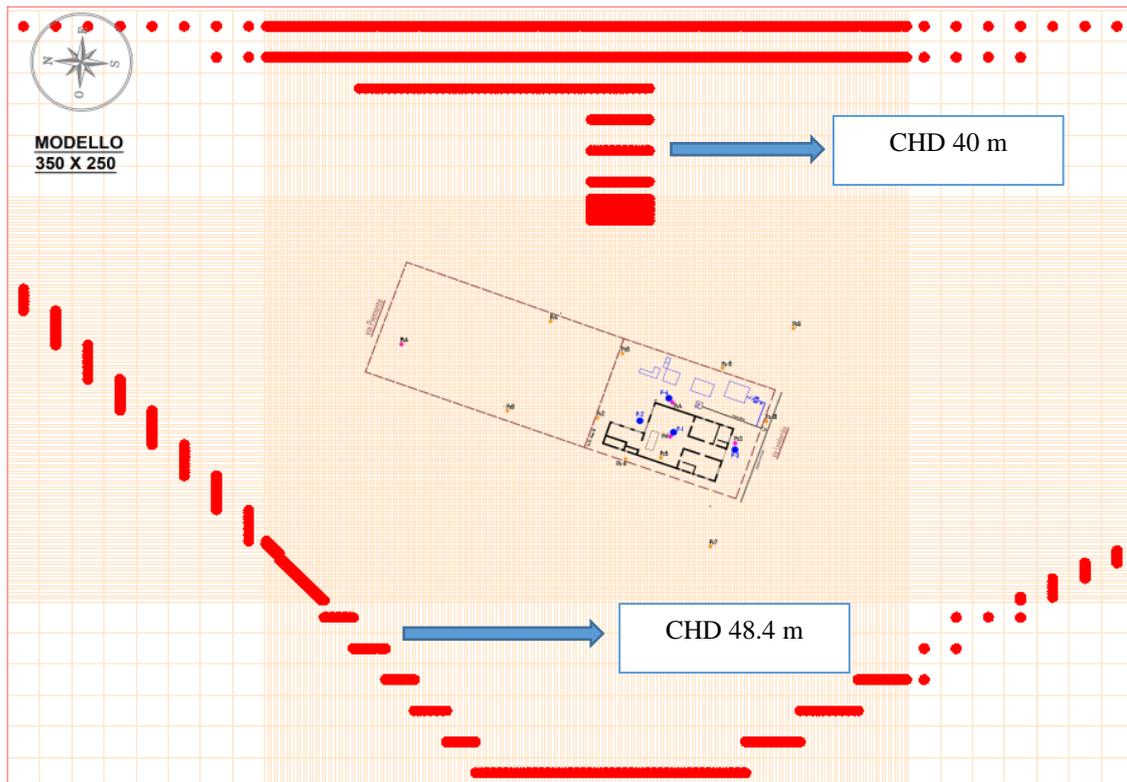


Figura 5.7: geometrie del carico idraulico costante (CHD) applicate in tutti i modelli.

### 5.3.3 Pozzi di pompaggio ed immissione

Dei 4 pozzi utilizzati nell'impianto di *P&T* del 2010-2011 (Figura 4.1) ne sono stati considerati soltanto due per la simulazione del nuovo impianto, la cui collocazione è mostrata in Figura 5.8. I due pozzi presentano una portata di estrazione totale pari a 0.5 L/s, di cui: 0.1 L/s per il pozzo di estrazione 1 e 0.4 L/s per il pozzo di estrazione 2. La portata elevata di quest'ultimo ha anche una funzione di contenimento idraulico (evitando che la contaminazione migri all'esterno del sito, in direzione di via Lombardia).

Nel sito oggetto di studio non sono attualmente presenti pozzi di immissione. Per simulare l'impianto integrato sono stati implementati nel modello due pozzi di resa mostrati in Figura 5.8. I pozzi di immissione presentano una portata totale di 0.5 L/s, pari a quella totale estratta dai due pozzi in pompaggio. In particolare, il pozzo di immissione 1 lavora ad una portata di 0,3 L/s mentre il pozzo 2 lavora ad una portata di 0.2 L/s.

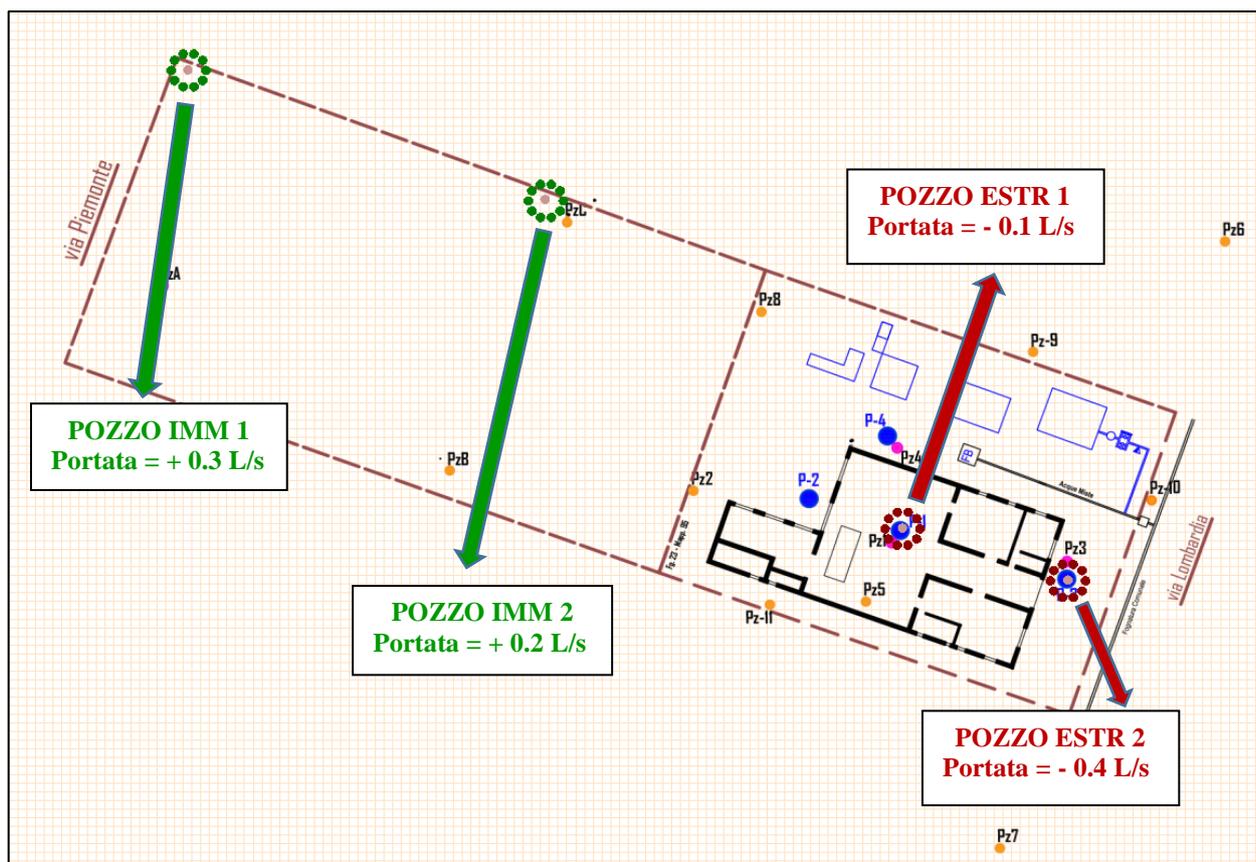


Figura 5.8: schema di pompaggio. I pallini attorno ai pozzi considerati rappresentano le particles (codice MODPATH). Nello specifico quelle di colore rosso sono in retrocessione, mentre quelle in verde son in avanzamento.

### 5.3.4 Dispersività, coefficienti di diffusione molecolare e coefficienti di partizione

Per la risoluzione dell'equazione di trasporto dei contaminanti (Cfr Par 4.2; Cap. 3) è necessario fornire alcuni coefficienti che definiscono le modalità di migrazione dei contaminanti stessi in un acquifero. La dispersività (longitudinale – DL, trasversale – Dh e verticale - Dv) è un parametro espresso in metri che descrive l'effetto di dispersione di un plume di contaminante nelle tre direzioni dello spazio, durante la migrazione in un mezzo poroso (GELHAR *et al.*, 1992). Tale dispersione è causata principalmente dall'eterogeneità dei pori entro cui l'acqua, ed il contaminante in essa disciolto, migrano. I valori di dispersività nelle tre direzioni cartesiane dipendono quasi esclusivamente dalle caratteristiche dal mezzo poroso che ospita la falda, ed è estremamente complesso definirli a priori. Essi vengono quindi solitamente stimati in fase di calibrazione di un modello (si applicano i valori che permettono di riprodurre meglio la forma del plume osservata in campo). Il codice di trasporto utilizzato in questo lavoro (MT3DMS) richiede la definizione di DL e del rapporto di questo con le due grandezze restanti (Dh/DL e Dv/DL). Nel presente lavoro, i valori di dispersività applicati ai modelli (Figura 5.9) sono il risultato di valori

bibliografici, calibrati successivamente secondo il sito oggetto di studio. Sono stati applicati valori di dispersività leggermente diversi per i due contaminanti considerati (TCE e 1.1-DCE) al fine di riprodurre in modo ottimale le forme dei plume ottenuti dalle interpolazioni (Par 5.2).

Un ulteriore parametro che contribuisce alla dispersione del plume nello spazio è il coefficiente di diffusione molecolare (Diff.). Tale coefficiente descrive la componente diffusiva del trasporto, ovvero la migrazione di contaminante guidata da un gradiente di concentrazione. Il fenomeno è generalmente trascurabile ad una scala di indagine analoga a quella qui investigata (dove il trasporto advettivo prevale su quello diffusivo), mentre gioca un ruolo importante a scala microscopica. Per completezza, è stato comunque assegnato un valore al coefficiente di diffusione molecolare nei modelli qui implementati (Figura 5.9), determinato attraverso tabelle bibliografiche (PANKOW & CHERRY, 1996).

TCE				
LAYER	Dh/DL	Dv/DL	DL	Diff. (Mq/giorno)
1	15	0.01	0.02	8.64E-05
2	0.5	0.01	50	8.64E-05
1.1 DCE				
LAYER	Dh/DL	Dv/DL	DL	Diff. (Mq/giorno)
1	15	0.01	0.02	8.64E-05
2	0.2	0.01	56	8.64E-05

Figura 5.9: valori di dispersività e di diffusione molecolare utilizzati in tutti i modelli.

In tutti modelli sono stati considerati anche i fenomeni di adsorbimento dei contaminanti organoclorurati sulla frazione organica della matrice solida. Il parametro che quantifica numericamente l'adsorbimento (modellato con isoterma lineare) è il coefficiente di partizione ( $K_d$ ), che corrisponde al prodotto tra la frazione di carbonio organico nella matrice solida ( $f_{oc}$ ) ed il coefficiente di partizione ottanolo-acqua ( $K_{oc}$ , specifico per ogni contaminante).

In assenza di dati sito-specifici, il valore di  $f_{oc}$  è stato assunto pari a 0.001 g-C/g-suolo (corrispondente al valore utilizzato nelle analisi di rischio secondo le linee guida APAT del 2008), mentre i valori di  $K_{oc}$  sono valori bibliografici proposti da PANKOW & CHERRY (1996). In Figura 5.10 vengono mostrati i valori di  $K_d$  implementati in tutti i modelli.

Coefficiente di partizione (Kd) [ $Kd = Koc * foc$ ]		
Koc	fraz. del carbonio organico (foc)	Kd (L/ug) TCE
1.26E-7 L/ug	0.001	1.26E-10

Koc	fraz. del carbonio organico (foc)	Kd (L/ug) 1.1-DCE
6.5E-8 L/ug	0.001	6.50E-11

Figura 5.10: valori del coefficiente di partizione relativo ai singoli inquinanti.

### 5.3.5 Schema temporale dei modelli

Tutti i modelli sono stati realizzati tenendo in considerazione una serie di eventi temporali principali, ricostruiti per il sito di studio in base alle (scarse) informazioni note. In Figura 5.11 viene mostrato uno schema riassuntivo dei principali eventi temporali considerati. Nel dettaglio:

- La data di sversamento della contaminazione è stata ipotizzata a 20 anni prima della bonifica (29/09/1990, corrispondente al giorno 0 per i modelli). Questa ipotesi si basa sul fatto che nel sito oggetto di studio era presente una galvanotecnica dismessa negli anni 90;
- Il termine della simulazione è stato fissato 20 anni dopo il monitoraggio dei contaminanti “di bianco” (effettuato in data 29/09/2010). La scelta è stata fatta seguendo questa logica: dal momento che 20 anni rappresentano la durata di vita standard di un impianto di climatizzazione, si è deciso di simulare la presenza di un impianto integrato di climatizzazione e bonifica a partire dal monitoraggio del 29/09/2010 (unico monitoraggio esistente della condizione di contaminazione “naturale”, cioè non influenzata dalla prima fase di bonifica), e di tenere tale impianto attivo per i 20 anni successivi;
- Tutti i modelli hanno quindi inizio in data 29/09/1990 e terminano in data 29/09/2030, per una durata totale di 40 anni (14600 giorni);
- Non essendoci monitoraggi del livello piezometrico successivi o antecedenti all’anno di bonifica 2010-2011, le condizioni al contorno di carico costante e ricarica implementate nei modelli di flusso (sia stazionari e sia transitori) sono costanti per tutta la durata del modello (40 anni) e rappresentative dei valori di monitoraggio piezometrico del 29/09/2010. Vengono quindi trascurate eventuali variazioni stagionali della superficie piezometrica “naturale”, per assenza di informazioni a riguardo.

### SCHEMA TEMPORALE DEGLI EVENTI CONSIDERATI NEI MODELLI

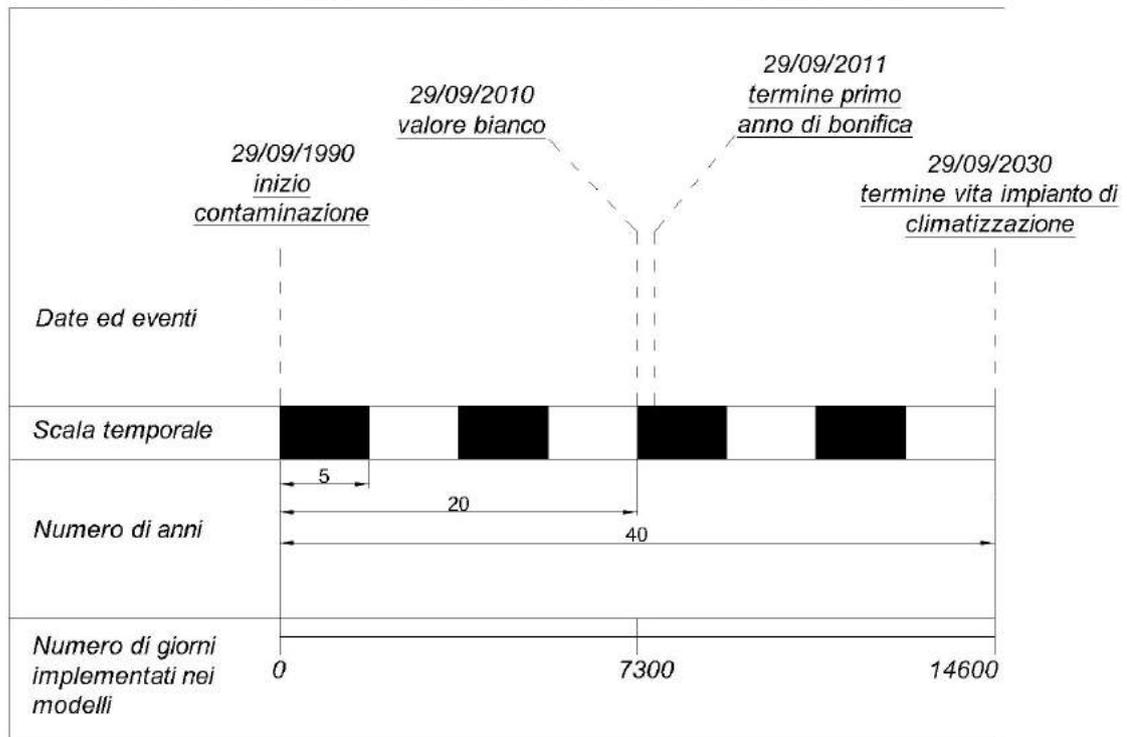


Figura 5.11: schema temporale considerato in tutti i modelli

#### 5.3.6 Caratteristiche specifiche del modello allo stato stazionario

Nel modello allo stato stazionario è stata applicata una portata costante nel tempo ai pozzi di pompaggio e di immissione, poiché la definizione stessa del regime stazionario richiede che tutte le condizioni al contorno di flusso rimangano invariate nel tempo.

Le singole portate applicate ai pozzi e la posizione degli stessi (Figura 5.8) sono state determinate in modo da evitare fenomeni di incompatibilità idrogeologica (eccessivo pompaggio e/o immissione nei confronti dell'acquifero ospitante) e di corto-circuitazione termica. La possibile presenza di quest'ultimo fenomeno è stata verificata utilizzando il codice di calcolo MODPATH. In particolare, sono state inserite delle particelle in retrocessione (in rosso in Figura 5.8) attorno ai pozzi di estrazione, e particelle in avanzamento (in verde in Figura 5.8), in modo da controllare che l'acqua estratta dai pozzi in pompaggio non provenisse dalla zona di immissione.

Riguardo alle condizioni al contorno di trasporto (per la simulazione della sorgente di contaminazione) è stata applicata una condizione di concentrazione associata alla ricarica (ovvero un flusso di concentrazione imposto - condizione al contorno di trasporto del 2° tipo), i cui valori sono riportati in Figura 5.12. I due valori di concentrazione associati alla

ricarica sono stati applicati al giorno 0 della simulazione (29/09/1990), calibrandoli in modo da restituire valori compatibili a quelli di “bianco” dopo 20 anni (il 29/09/2010). Le concentrazioni riportate in Figura 5.12 sono state applicate al modello in corrispondenza del “focolaio” di contaminazione definito tramite le interpolazioni (Cfr. Par 5.2), come mostrato in Figura 5.13.

Ricarica (mm/anno)	conc. TCE (ug/L)
164	6.00E+06

Ricarica (mm/anno)	conc. 1.1-DCE (ug/L)
164	2.00E+05

Figura 5.12: valori di concentrazione associata alla ricarica implementati

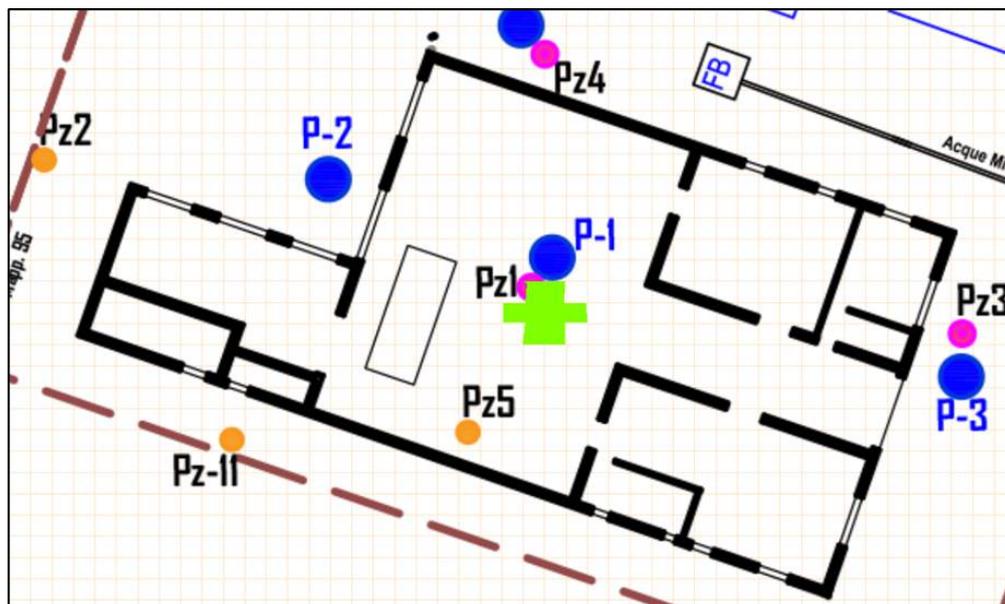


Figura 5.13: in verde la condizione al contorno di concentrazione associata alla ricarica, assegnata in corrispondenza del focolaio di contaminazione

Il modello stazionario ha quindi permesso:

1) un posizionamento e dimensionamento ottimale dei pozzi di pompaggio e immissione, compatibile sia con le condizioni idrogeologiche del sito e sia con l'impianto oggetto di studio. I principali presupposti considerati per il corretto funzionamento dell'impianto sono:

- I pozzi di estrazione devono essere in grado di richiamare efficacemente la contaminazione nonché fornire portate adeguate per lo svolgimento della bonifica;
- I pozzi di immissione non devono causare fenomeni di circuitazione termica;
- La portata massima in estrazione sfruttabile è pari a 0.5 L/s, mentre la portata massima in immissione sfruttabile è pari a 1.5 L/s.

2) di calibrare agevolmente un valore di contaminazione iniziale (da applicare al giorno 0 della simulazione) in grado di riprodurre i valori osservati in campo 20 anni dopo (monitoraggio del 29/09/2010).

I risultati ottenuti da tale modello saranno mostrati e discussi dettagliatamente nel Capitolo 6.

### **5.3.7 Caratteristiche specifiche del modello allo stato transitorio “semplificato”**

Per la costruzione di questo modello sono state considerate le posizioni dei pozzi e le portate di pompaggio ed estrazione definite tramite il modello stazionario. In questo caso la simulazione in regime transitorio ha permesso di variare lo schema di pompaggio dei pozzi rispetto al caso stazionario, “accendendoli” o “spegnendoli” durante i 40 anni di modellazione.

Questo modello è denominato “semplificato” poiché gli intervalli di pompaggio adoperati (Tabella 5.14) non hanno l'obiettivo di simulare l'impianto integrato oggetto di studio (come invece accadrà nel modello “complesso”), bensì un classico impianto *P&T*, il quale prevede uno schema temporale di pompaggio e immissione semplice, senza interruzioni dal momento di accensione dell'impianto.

Questo modello è risultato utile per “raffinare” l'applicazione delle condizioni al contorno di trasporto rispetto al modello stazionario precedente: se il modello stazionario ha permesso di determinare i valori di concentrazione iniziale utili per raggiungere una condizione di contaminazione compatibile con il monitoraggio di bianco rilevato il 19/09/2010, il modello transitorio “semplificato” ha permesso invece di stimare i valori di concentrazione da applicare alla sorgente (Tabella 5.15) successivamente al punto di bianco. In particolare, i valori di concentrazione assegnati alla zona sorgente a partire dal giorno 7300 (cioè dopo i primi 20 anni di simulazione) sono rispettivamente  $4.5E6 \mu\text{g/L}$  per il TCE e  $2.0E5 \mu\text{g/L}$  per 1.1-DCE e sono stati calibrati in modo da ottenere, 365 giorni dopo, valori comparabili con quelli ottenuti dal monitoraggio effettuato al termine della bonifica (effettuato in data 29/09/2011). Tali valori sono stati mantenuti costanti per 5 anni, e sono stati poi diminuiti linearmente con cadenza quinquennale, in modo da simulare un ipotetica diminuzione della concentrazione alla sorgente. Risulta opportuno precisare che i valori di concentrazione applicati alla sorgente a partire dall'ultima data di monitoraggio disponibile (29/09/2011)

sono totalmente ipotetici, dal momento che non è disponibile alcun dato successivo a tale data, in grado di fornire un controllo sull'andamento della contaminazione al sito. Eventuali nuovi dati acquisiti in futuro potranno essere integrati nei modelli qui impostati (secondo la pratica nota come *post audit*), al fine di migliorare la simulazione della sorgente di contaminazione.

IMPIANTO ACCESO	DATE		TIME SERIES		PUMP	ANNO
	START	STOP	START	STOP		
NO	29/09/1990	29/09/2010	0	7300	NO	20
SI	29/09/2010	29/09/2030	7300	14600	SI	40

Tabella 5.14: *schema temporale di pompaggio*

TIME SERIES (TCE)		Ricarica (mm/anno)	concentrazione (ug/L)
0	7300	164	6.00E+06
7300	9125	164	4.50E+06
9125	10950	164	2.25E+06
10950	12775	164	1.13E+06
12775	14600	164	5.62E+05

TIME SERIES (1.1-DCE)		Ricarica (mm/anno)	concentrazione (ug/L)
0	7300	164	2.00E+05
7300	9125	164	1.00E+05
9125	10950	164	5.00E+04
10950	12775	164	1.00E+04
12775	14600	164	5.00E+03

Tabella 5.15: *valori di concentrazione applicata alla ricarica implementati nei modelli*

### 5.3.8 Caratteristiche specifiche del modello allo stato transitorio “complesso”

Questo modello rappresenta quello di maggiore complessità realizzato nell’ambito del presente lavoro. Diversamente dal modello allo stato transitorio “semplificato”, qui vengono considerati schemi temporali per i pozzi di pompaggio ed immissione più dettagliati, rappresentativi dell’impianto integrato oggetto di studio. In Tabella 5.16 viene mostrato lo schema temporale di pompaggio relativo a un anno di funzionamento dell’impianto integrato di bonifica e di climatizzazione. L’anno mostrato in Tabella 5.16 (a titolo di esempio) è il 1° anno a partire dalla messa in funzione dell’impianto (il 21° dall’inizio della simulazione). Nello specifico, l’impianto viene attivato esclusivamente nel periodo invernale (per il riscaldamento) e nel periodo estivo (per il raffrescamento) e di conseguenza anche la bonifica della falda acquifera avviene soltanto nei periodi di attività dell’impianto (estate e inverno).

Le condizioni di concentrazione applicate alla sorgente sono le stesse già definite nel modello transitorio “semplificato”.

IMPIANTO ACCESO	DATE		TIME SERIES		PUMP	ANNO	PERIODO
	START	STOP	START	STOP			
NO	29/09/1990	29/09/2010	0	7300	0	<b>20</b>	
NO	29/09/2010	15/10/2010	7300	7316	0		
<b>SI</b>	15/10/2010	15/04/2011	7316	7498	SI		<b>INVERNALE</b>
NO	15/04/2011	15/06/2011	7498	7559	0		
<b>SI</b>	15/06/2011	31/08/2011	7559	7636	SI		<b>ESTIVO</b>
NO	31/08/2011	29/09/2011	7636	7665	0	<b>21</b>	

Tabella 5.16: schema temporale di pompaggio utilizzati nei modelli transitori complessi.

### 5.3.9 Sintesi di tutti i dati utilizzati per l’implementazione dei modelli

In Tabella 5.17 sono sintetizzati i vari parametri descritti nei paragrafi precedenti, utilizzati per l’implementazione dei vari modelli realizzati.

PARAMETRI DI BASE												
TCE						1.1-DCE						
Dispersività idrodinamica e di diffusione molecolare	LAYER	Dh/DL	Dv/DL	DL	Diff. (Mq/giorno)		LAYER	Dh/DL	Dv/DL	DL	Diff. (Mq/giorno)	
	1	15	0.01	0.02	8.64E-05		1	15	0.01	0.02	8.64E-05	
	2	0.5	0.01	50	8.64E-05		2	0.2	0.01	56	8.64E-05	
Coefficiente di partizione (Kd) [ Kd = Koc * foc]	Koc		fraz. del carbonio organico (foc)			Kd (L/ug)	Koc		fraz. del carbonio organico (foc)			Kd (L/ug)
	1.26E-7 L/ug		0.001			1.26E-10	6.5E-8 L/ug		0.001			6.50E-11
MODELLO STAZIONARIO												
Concentrazione applicata alla ricarica	Ricarica (mm/anno)		conc. TCE (ug/L)				Ricarica (mm/anno)		conc. 1.1-DCE (ug/L)			
	164		6.00E+06				164		2.00E+05			
Pompaggio (schema di pompaggio valido per tutti i modelli) Portata di estrazione totale = -1.5 L/s Portata di immissione totale = +1.5 L/s	WELL ID	X	Y	ELEVATION	WELL BOTTOM	SCREEN ID	SCREEN TOP Z	SCREEN BOTTOM Z	PUMP. START DATE	PUMP. END DATE	PUMP. RATE	
	POZZO ESTR 1	207.43	114.58	46.6	37.6	POZZO ESTR 1	39.6	37.6	0	7300	-0.1	
	POZZO ESTR 2	226.43	108.51	46.6	37.6	POZZO ESTR 2	39.6	37.6	0	7300	-0.4	
	POZZO IMM 1	125.51	167.59	46.6	37.6	POZZO IMM 1	39.6	37.6	0	7300	0.3	
	POZZO IMM 2	166.49	152.58	46.6	37.6	POZZO IMM 2	39.6	37.6	0	7300	0.2	
Ricarica (infiltrazione efficace mm/anno)	Ricarica (mm/anno)					Ricarica (mm/anno)						
	164					164						
Carico idraulico costante (CHD) in metri	A monte idrogeologico			A valle idrogeologico								
	48.4			40								
MODELLO TRANSITORIO 1												
<i>(Durata totale del modello 40 anni pari a 14600 giorni. I primi 20 anni rappresentano lo sviluppo della contaminazione fino al valore bianco, i successivi rappresentano l'accensione dell'impianto in continuo)</i>												
Concentrazione alla ricarica * il giorno 7300 rappresenta il valore bianco	TIME SERIES (TCE)		Ricarica (mm/anno)	concentrazione (ug/L)			TIME SERIES (1.1-DCE)		Ricarica (mm/anno)	concentrazione (ug/L)		
	0	7300	164	6.00E+06			0	7300	164	2.00E+05		
	7300	9125	164	4.50E+06			7300	9125	164	1.00E+05		
	9125	10950	164	2.25E+06			9125	10950	164	5.00E+04		
	10950	12775	164	1.13E+06			10950	12775	164	1.00E+04		
	12775	14600	164	5.62E+05			12775	14600	164	5.00E+03		
Pompaggio			DATE		TIME SERIES							
			IMPIANTO ACCESO	START	STOP	START	STOP	PUMP	ANNO			
			NO	29/09/1990	29/09/2010	0	7300	NO	20			
			SI	29/09/2010	29/09/2030	7300	14600	SI	40			
MODELLO TRANSITORIO 2												
<i>(Durata totale del modello 40 anni pari a 14600 giorni. I primi 20 anni rappresentano lo sviluppo della contaminazione fino al valore bianco, i successivi rappresentano l'accensione e lo spegnimento dell'impianto in base ai periodi invernali ed estivi)</i>												
Pompaggio (Ecludendo i primi 20 anni, gli intervalli di accensione e spegnimento dell'impianto mostrati in tabella riguardanti il ventunesimo anno, si ripetono per tutti gli anni successivi fino al raggiungimento del quarantesimo)			DATE		TIME SERIES							
			IMPIANTO ACCESO	START	STOP	START	STOP	PUMP	ANNO	PERIODO		
			NO	29/09/1990	29/09/2010	0	7300	0	20			
			NO	29/09/2010	15/10/2010	7300	7316	0				
			SI	15/10/2010	15/04/2011	7316	7498	SI		INVERNALE		
			NO	15/04/2011	15/06/2011	7498	7559	0				
			SI	15/06/2011	31/08/2011	7559	7636	SI		ESTIVO		
			NO	31/08/2011	29/09/2011	7636	7665	0	21			

Tabella 5.17: sintesi dei vari parametri utilizzati per l'implementazione nei vari modelli realizzati.

# **6.RISULTATI DELLA** **MODELLAZIONE E** **DISCUSSIONE**

## 6.1 MODELLO STAZIONARIO

### 6.1.1 Andamento piezometrico

Attraverso l'implementazione delle due condizioni al contorno di carico costante a monte e valle idrogeologico dell'area di studio (Cfr. Par. 3.2; Cap. 5), e dell'infiltrazione efficace stimata per il sito (Cfr. Par. 2; Cap. 5), è stato possibile riprodurre numericamente la piezometria dell'acquifero oggetto di studio (Figura 6.1) non perturbata dal pompaggio. In quest'ultima si può notare come l'andamento sia concorde con quello ottenuto tramite l'interpolazione dei dati di monitoraggio del 29/09/2010: la direzione principale di flusso è Est-Ovest, con qualche anomalia nella parte centrale, ed il gradiente medio è di 0.03. L'area inclusa tra le due linee rosse tratteggiate rappresenta quella in cui si è cercato di riprodurre una piezometria rappresentativa del sito.

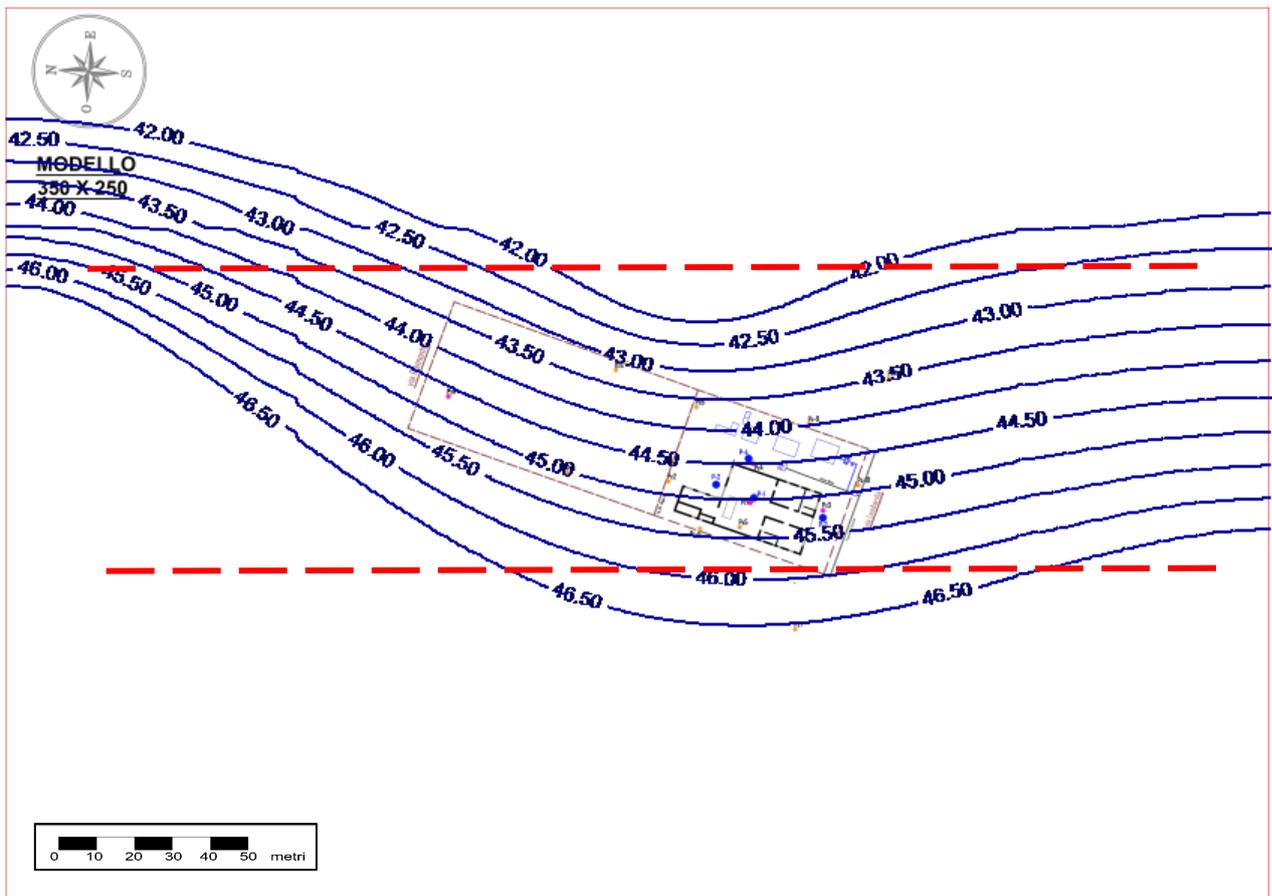


Figura 6.1: piezometria simulata dell'area oggetto di studio. Le linee tratteggiate in rosso indicano l'estremità dell'area oggetto di studio.

In Figura 6.2 viene mostrata una tabella che confronta i valori di carico idraulico osservati nei piezometri monitorati con quelli simulati negli stessi punti. È possibile notare come siano presenti dei piccoli discostamenti (“residui”) tra i due valori in alcuni piezometri, dovuti probabilmente ad eterogeneità litologiche e di conducibilità idraulica non considerate in fase di elaborazione dati. Questi discostamenti erano abbastanza prevedibili in quanto un

insufficiente quantitativo di informazioni stratigrafiche e di valori di permeabilità ha reso necessaria una notevole schematizzazione dell'acquifero modellato, da cui discende un certo grado di approssimazione dei risultati ottenuti. Il residuo massimo tra carichi calcolati ed osservati è pari a + 38 cm mentre il residuo minimo è pari a - 0.5 cm. Nel complesso, l'andamento piezometrico simulato risulta comunque concorde con quello ottenuto dall'interpolazione dei dati di monitoraggio.

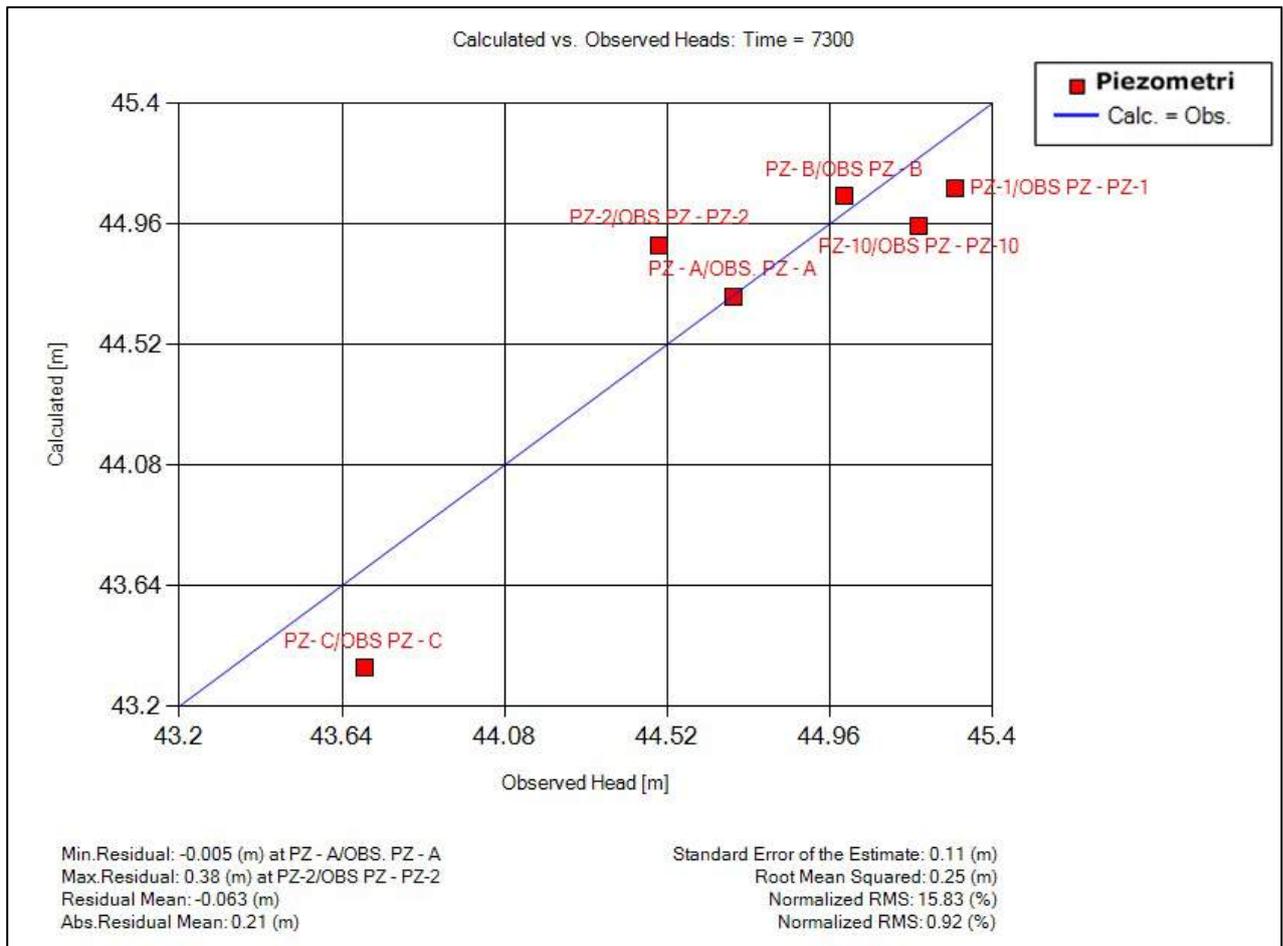


Figura 6.2: confronto fra i valori piezometrici osservati in campagna e i valori simulati

### 6.1.2 Valutazione dello schema di pompaggio e di eventuali fenomeni di corto-circuitazione termica

Il modello di flusso allo stato stazionario è stato sfruttato per valutare il corretto funzionamento dell'impianto integrato, sia per i fini della bonifica e sia per i fini della climatizzazione. I sistemi geotermici *open loop* si basano sullo scambio termico con l'acqua di falda. Una corretta progettazione degli impianti a circuito aperto prevede alla base uno studio della sostenibilità esterna (studio del plume termico che si origina a valle della reimmissione di acqua in falda) e interna (studio della corto-circuitazione, ovvero quanta acqua reiniettata torna ai pozzi di prelievo). Quest'ultima in particolare serve per stabilire se un impianto potrà o meno operare in modo sostenibile nel tempo (CASSANO & SETHI, 2015). Nel caso di studio non sono stati costruiti modelli del calore e non è stato quindi direttamente investigato il plume termico associato all'impianto di condizionamento, ma è stata valutata soltanto l'eventuale interazione tra le acque iniettate in falda dai pozzi di immissione con quelle estratte dai pozzi di pompaggio (corrispondente in prima approssimazione alla valutazione del fenomeno di corto-circuitazione termica). Tale valutazione è stata fatta attraverso l'utilizzo del codice di calcolo MODPATH associato al codice di flusso MODFLOW, come descritto nel Par. 4.3 (Cap 3). È stato necessario testare numerosi schemi di pompaggio ed immissione prima di ottenere una configurazione esente da fenomeni di interazione tra le acque immesse e quelle pompate. I vari tentativi prevedevano sia differenti disposizioni dei pozzi e sia portate differenti. La Figura 6.3 mostra a titolo esemplificativo uno schema di pompaggio non corretto dal punto di vista dell'interazione tra acque immesse e pompate, costituito da 3 pozzi di estrazione e 2 pozzi di immissione, con portate totali in ingresso e in uscita pari a 1.5 L/s. In questo modello sono evidenti fenomeni di interazione tra le acque immesse e quelle pompate, indicati dalle *pathlines* ottenute tramite MODPATH. Le *pathlines* mostrate in Figura 6.3 rappresentano i percorsi di filetti fluidi in avanzamento a partire dai pozzi di immissione ed in retrocessione a partire dai pozzi di estrazione, lungo un periodo di 20 anni. Si osserva che parte dell'acqua dei pozzi di immissione ritorna nei pozzi di estrazione. La presenza di una tale interazione, oltre a provocare malfunzionamenti all'impianto di climatizzazione, renderebbe anche più lenta la bonifica, in quanto il "ripescaggio" di acqua immessa (e quindi già trattata) diminuirebbe la capacità dei pozzi di pompaggio di estrarre acqua contaminata da trattare. Uno schema di pompaggio e immissione ottimale definito per l'impianto oggetto di studio è mostrato in Figura 6.4. La portata totale di estrazione e di immissione applicata ai pozzi è di 0.5 L/s. Le *pathlines* in avanzamento (di colore verde) e in retrocessione (di colore rosso) mostrano l'assenza di interazioni tra acqua immessa e pompata. Pertanto la configurazione dei pozzi di pompaggio ed immissione che è stata utilizzata nei modelli successivi è quella mostrata in Figura 6.4.

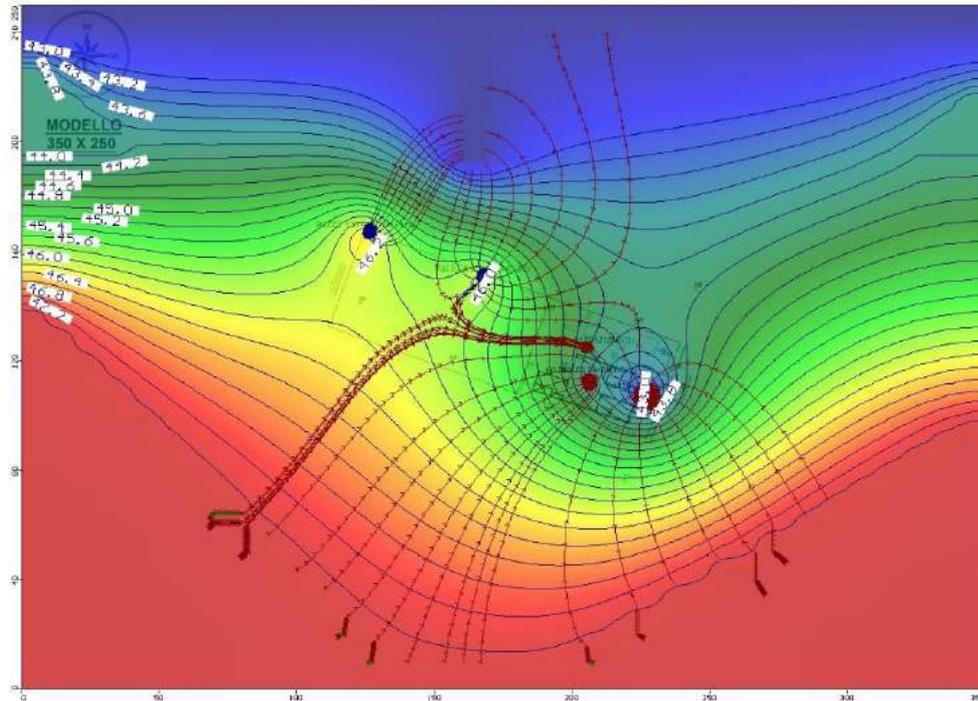


Figura 6.3: dimensionamento e disposizione dei singoli pozzi non corretta. Le pathlines ottenute con il codice di calcolo MODPATH mostrano come l'acqua reimessa nei due pozzi più distanti rispetto al fabbricato ritorni ai tre pozzi di estrazione.

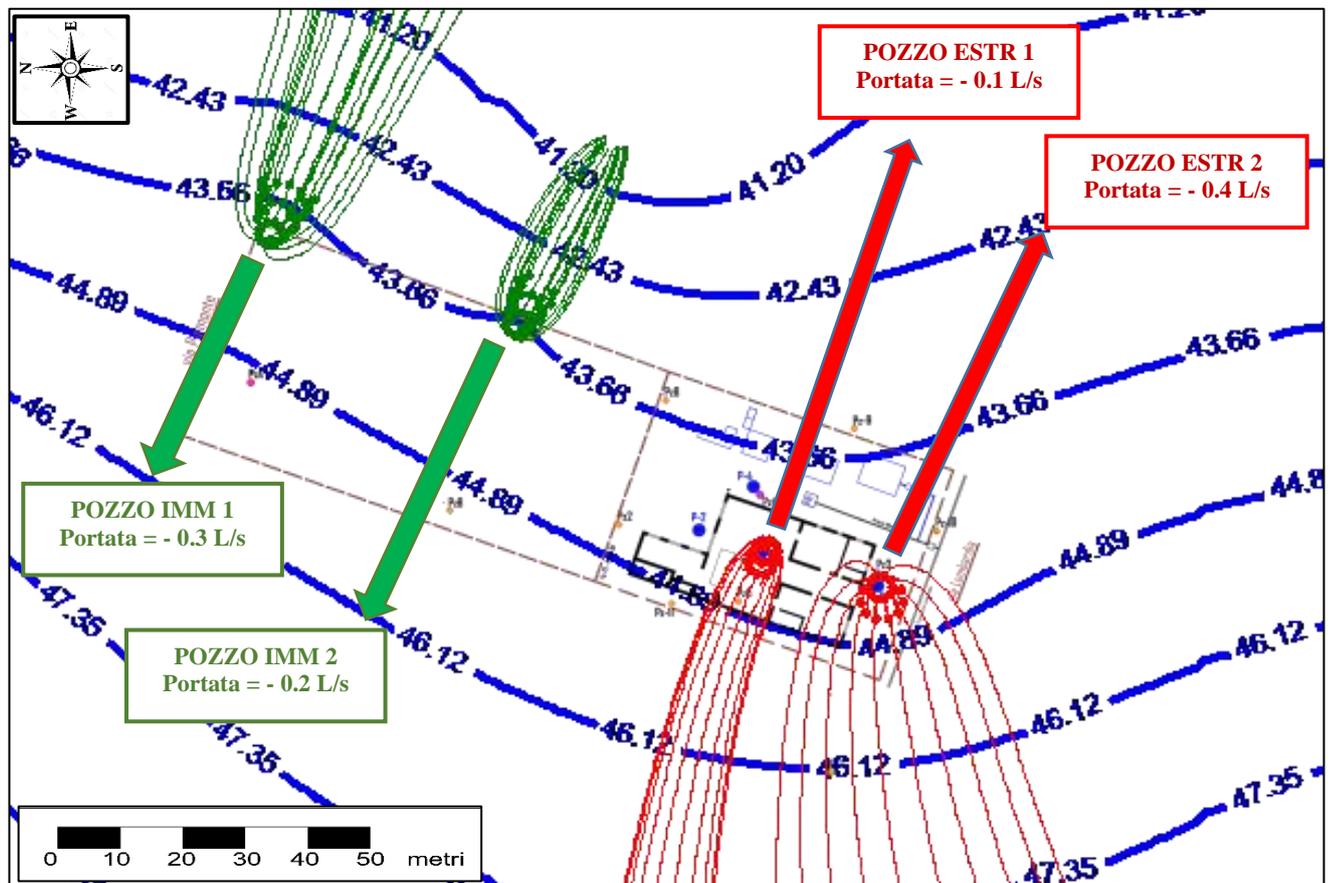


Figura 6.4: schema di pompaggio ottimale definito per il sito. Le pathlines di colore rosso indicano la provenienza dell'acqua estratta, mentre le pathlines di colore verde indicano l'avanzamento dell'acqua immessa.

Per quanto riguarda la verifica dell'effettiva corrispondenza tra portate immesse ed estratte, in Figura 6.5 è possibile notare i singoli contributi (*in* e *out*) di tutte le condizioni al contorno di flusso implementate nel modello stazionario, in termini di portate ( $\text{m}^3/\text{giorno}$ ). In particolare, si osserva come le portate associate ai pozzi (condizione “*wells*” nel grafico di Figura 6.5) risultino uguali in ingresso (*in* – pozzi di immissione) ed in uscita (*out* – pozzi di pompaggio) e pari a  $43.2 \text{ m}^3/\text{giorno}$  ( $0,5 \text{ L/s}$ ). È quindi rispettata la simmetria tra le portate pompate ed immesse, requisito essenziale di un impianto geotermico *open loop*. In Figura 6.6 viene mostrato, a titolo esemplificativo, un bilancio di massa relativo ad uno schema di pompaggio ed immissione non ottimale. Nel caso specifico erano state assegnate portate di  $1.5 \text{ L/s}$  ( $129.6 \text{ m}^3/\text{giorno}$ ) in estrazione ed in immissione, ma il bilancio mostra che i pozzi in pompaggio sono in grado di estrarre soltanto  $43.2 \text{ m}^3/\text{giorno}$  ( $0.5 \text{ L/s}$ ) degli  $1.5 \text{ L/s}$  applicati, dando origine quindi ad uno squilibrio tra portate estratte ed immesse (risultando le ultime il triplo delle prime). Tale osservazione conferma quanto già illustrato nel Par 3.6, Cap. 5 riguardo alle portate applicate ai pozzi: considerando tutte le schematizzazioni adottate per la costruzione del modello, la portata di totale  $0.5 \text{ L/s}$  è la massima estraibile dall'acquifero tramite i due pozzi in pompaggio definiti per l'impianto integrato.

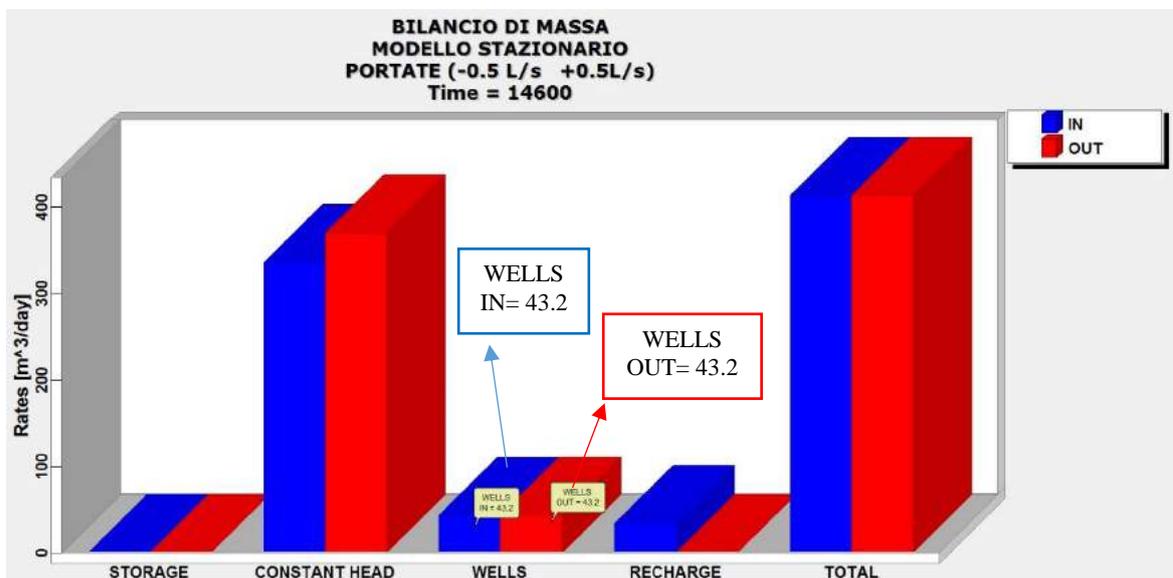


Figura 6.5: bilancio di massa relativo al modello stazionario. In questo caso lo schema di pompaggio ed immissione risulta compatibile con gli obiettivi della modellazione.

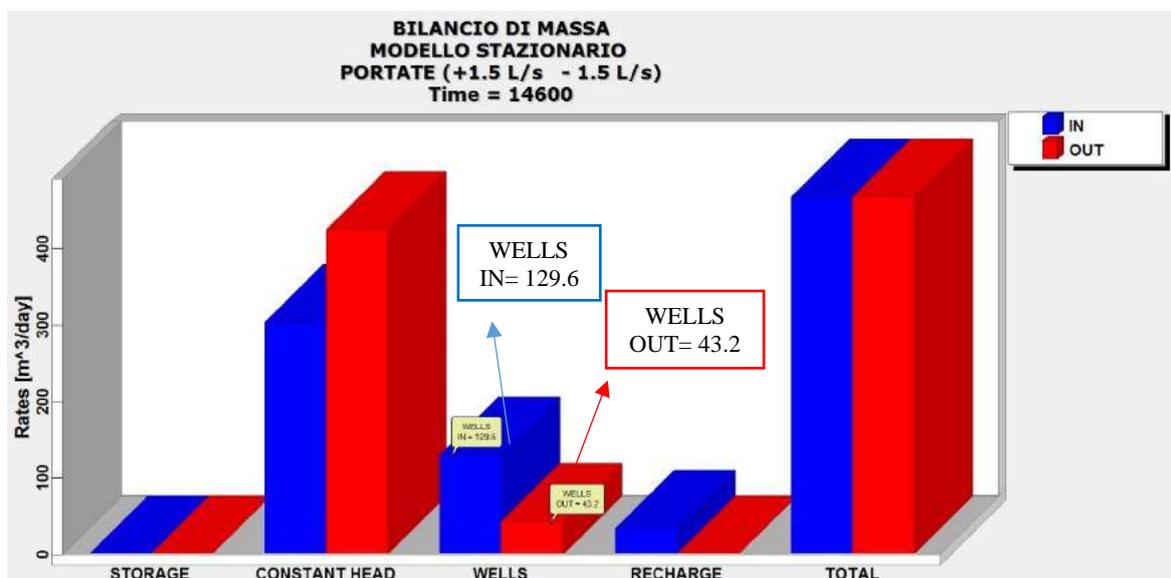
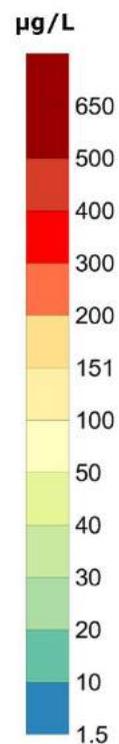
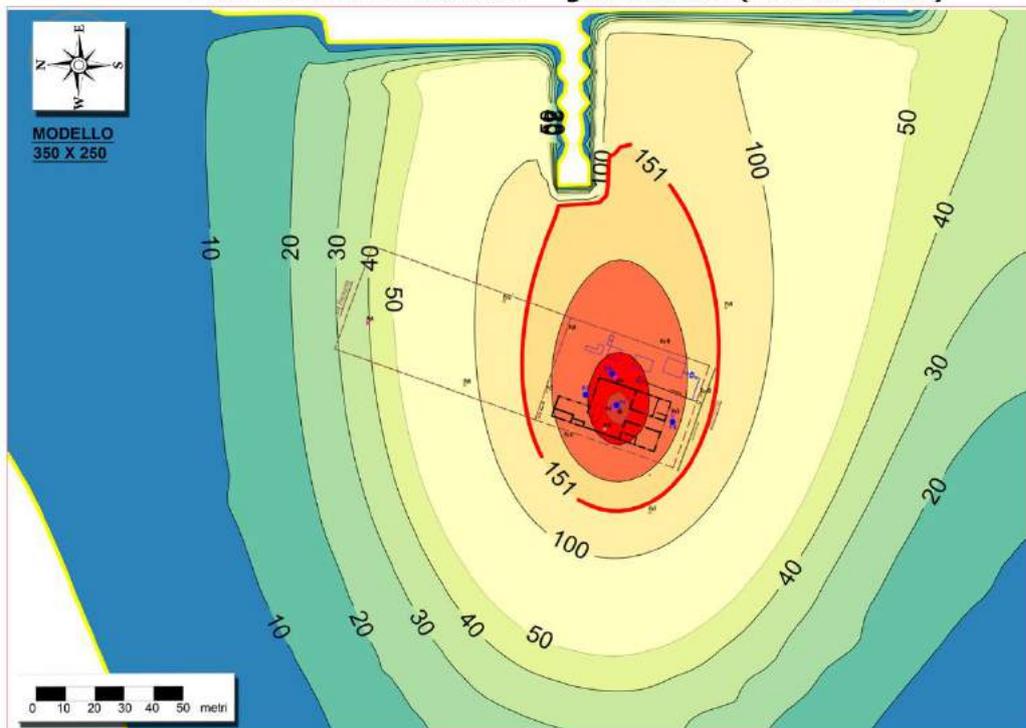


Figura 6.6: bilancio di massa riguardante uno schema di pompaggio incompatibile con gli obiettivi della modellazione: le portate estratte risultano molto notevolmente inferiori rispetto a quelle immesse.

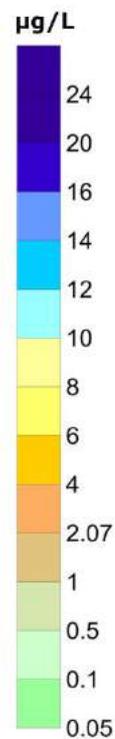
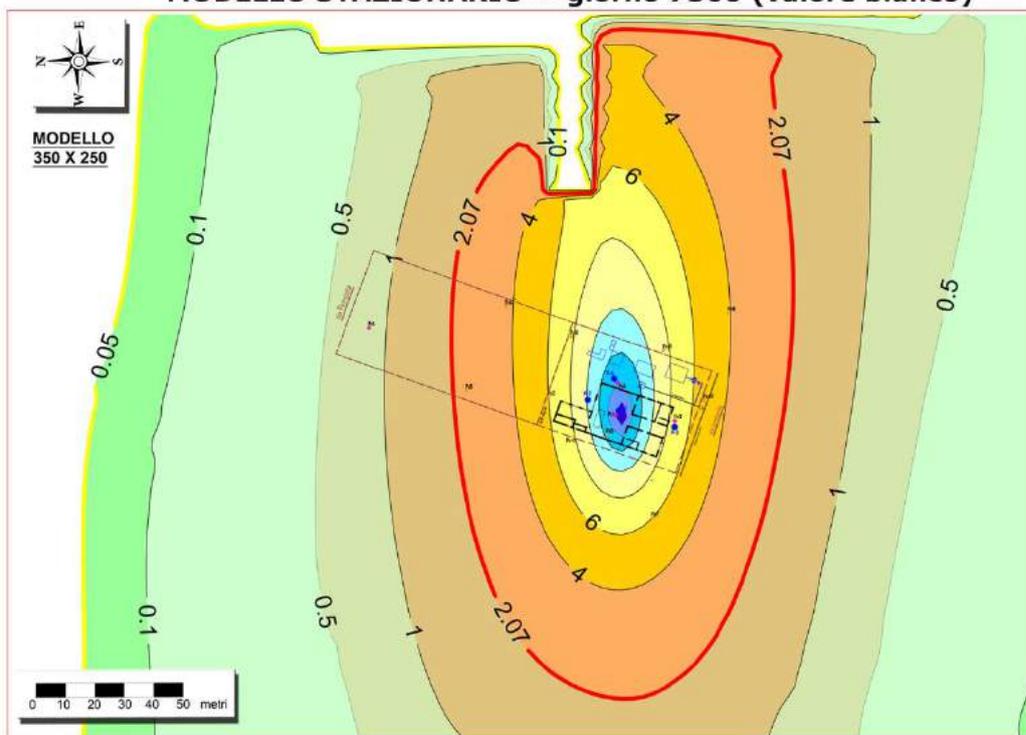
### **6.1.3 Trasporto dei contaminanti (TCE e 1.1-DCE)**

I valori di concentrazione di contaminanti da applicare alla zona sorgente come condizione al contorno di trasporto del secondo tipo (“concentrazione applicata alla ricarica”) sono stati definiti come descritto nel Paragrafo 3.6 (Cap 5) ed hanno permesso di simulare la migrazione dei plumes di TCE e al 1.1-DCE (Figura 6.7). I risultati mostrati in Figura 6.7 simulano le concentrazioni relative al giorno 7300 (anno 20), corrispondente al valore bianco (29/09/2010) del monitoraggio eseguito in fase di pre-attivazione dell’impianto di bonifica adoperato nel 2010-2011. È importante notare che la simulazione del trasporto dei contaminanti allo stato stazionario è stata effettuata considerando i pozzi di immissione e di pompaggio inattivi (utilizzando quindi la distribuzione di flusso descritta nel Par. 6.1.1), dal momento che l’obiettivo di questo modello era quello di riprodurre i plume dei due contaminanti nella situazione “di bianco”, cioè quando il sistema non era perturbato dalla presenza di impianti. Considerando esclusivamente i valori di concentrazione all’interno del sito, le due mappe di Figura 6.7 presentano una buona corrispondenza con le mappe interpolate in fase di elaborazione dati (cfr Par 3.2, Cap 5). In particolare, i valori massimi di concentrazione ottenuti nella zona definita come focolaio di contaminazione sono di 650 µg/L per il TCE e 24 µg/L per 1.1-DCE, e coincidono con i valori osservati nel monitoraggio del 29/09/2010. Inoltre è possibile notare il valore delle CSR indicato con delle isolinee di colore rosso che in entrambi i casi è nettamente al di fuori dei confini del sito. In Figura 6.8 e 6.9 vengono mostrati dei grafici che confrontano i valori osservati in campo con i valori simulati, in corrispondenza di tutti i piezometri monitorati. Si conferma un buon livello di corrispondenza generale tra i due set di dati. Le principali discrepanze tra valori osservati e simulati (fino ad un massimo di 88,26 µg/L per il TCE e di 3.42 µg/L per 1.1-DCE) si hanno sempre in prossimità del piezometro 2 (Pz-2) ubicato in un punto caratterizzato dalla presenza elevata di sedimenti molto fini, in particolare da argille e limi argillosi (sondaggio S12, in appendice).

**TRICLOROETILENE (TCE)**  
**MODELLO STAZIONARIO -- giorno 7300 (valore bianco)**

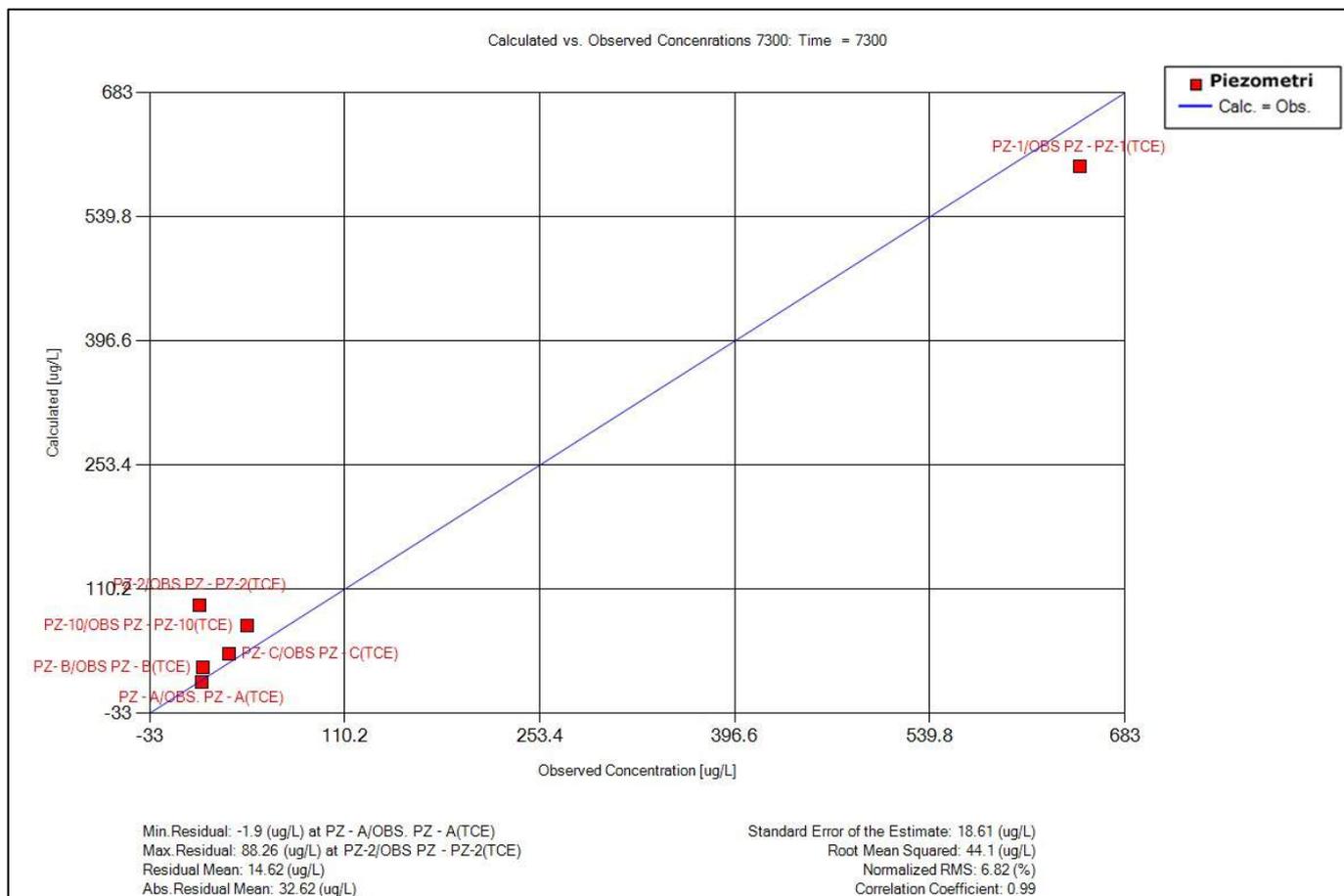


**1.1-DICLOROETILENE (1.1-DCE)**  
**MODELLO STAZIONARIO -- giorno 7300 (valore bianco)**



— isolinee di colore rosso indicano il valore limite delle CSR (concentrazioni soglia di rischio). CSR (TCE)=151 µg/L;  
 CSR (1,1-DCE)= 2,07 µg/L  
— isolinee di colore giallo indicano il valore limite delle CSC (concentrazioni soglia, D.lgs 152/2006). CSC (TCE)=1,5  
 µg/L; CSC (1,1-DCE)= 0,05 µg/L

**Figura 6.7:** mappe delle iso-concentrazione relative al TCE e al 1,1-DCE corrispondenti al giorno 7300 (valore bianco). Tutti i valori sono in  $\mu\text{g/L}$ .



**Figura 6.8:** il grafico mette a confronto i valori di concentrazione del TCE osservati con quelli simulati.

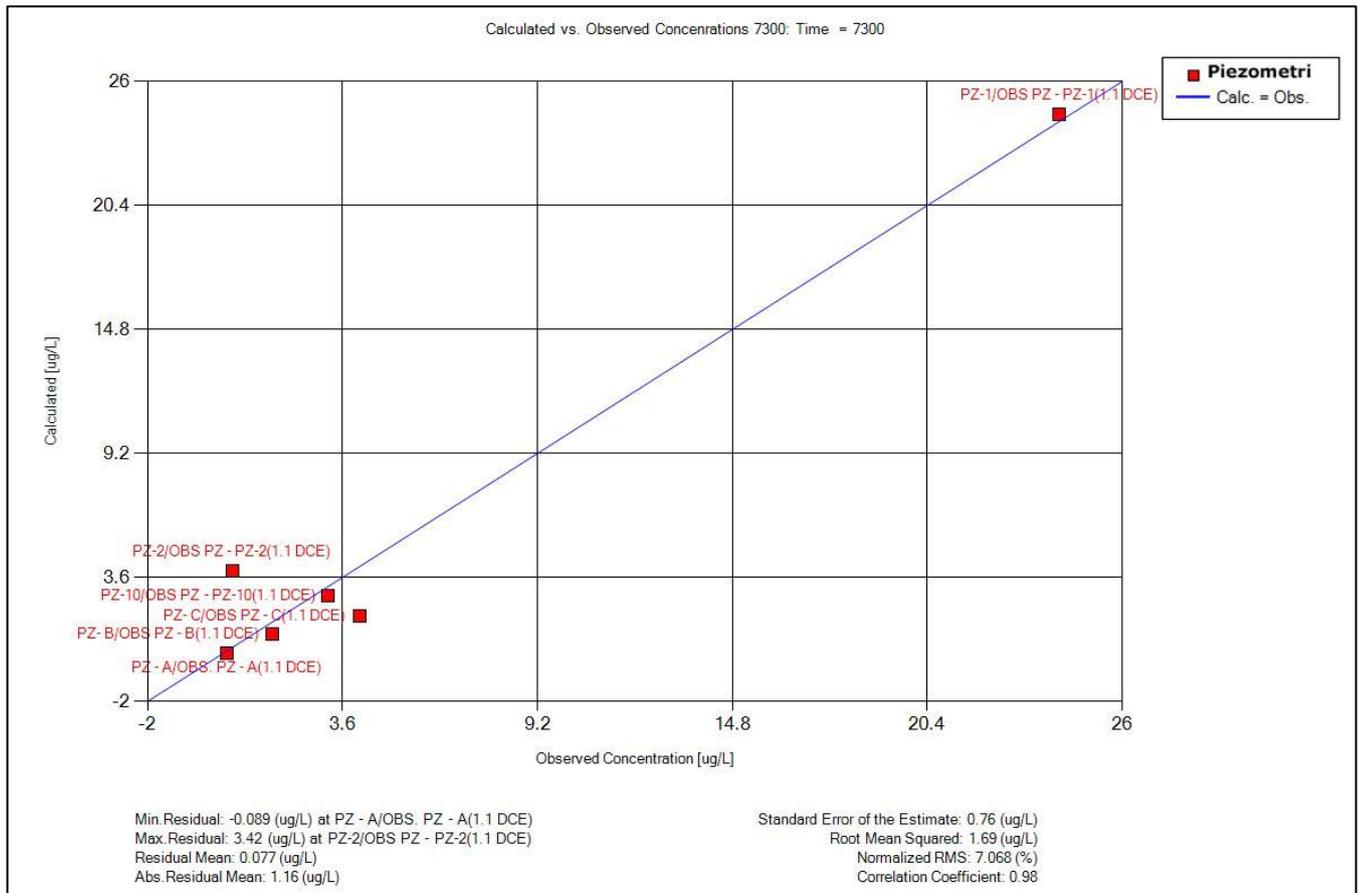


Figura 6.9: il grafico mette a confronto i valori di concentrazione del 1,1-DCE osservati con quelli simulati.

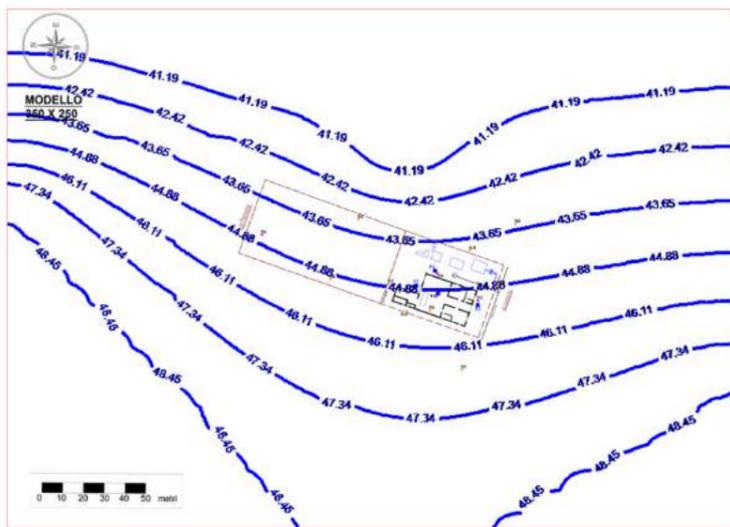
## 6.2 MODELLO TRANSITORIO

I risultati riportati nel presente Paragrafo si riferiscono principalmente al modello transitorio “complesso”, poiché i risultati relativi al modello transitorio “semplificato”, utili a perfezionare la simulazione della sorgente di contaminazione, sono integrati all’interno del modello complesso. Sarebbe quindi ridondante discutere gli output di entrambi i modelli.

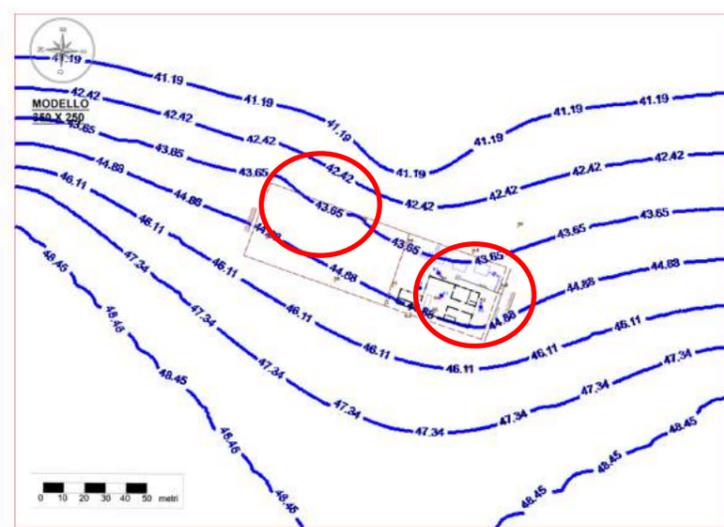
### 6.2.1 Effetti del pompaggio e dell’immissione nel tempo

Il modello transitorio “complesso” ha permesso di valutare in modo dettagliato tutti gli effetti dovuti al pompaggio ed all’immissione di acqua, subito dall’acquifero durante i 20 anni di attività dell’impianto integrato. In Figura 6.10 vengono mostrati, a titolo di esempio, gli andamenti del livello piezometrico nel tempo durante il primo anno di utilizzo dell’impianto (seguendo gli intervalli della discretizzazione temporale descritta nel Par. 3.8, Cap. 5) e l’andamento piezometrico al termine della modellazione (giorno 14600 corrispondente tra il resto al termine di vita fissato per l’impianto integrato). Per quanto riguarda il primo anno di attività, sono mostrati gli effetti derivanti dall’accessione e spegnimento stagionali dell’impianto. I risultati degli anni successivi, non mostrati nel presente elaborato, si ripetono in modo più o meno regolare per i successivi 19 anni, cioè fino al termine della modellazione. In Figura 6.10 si osserva che nei periodi di attivazione dell’impianto (b e d) la piezometria iniziale imperturbata viene sottoposta a degli stress che causano delle lievi depressioni piezometriche nell’intorno dei pozzi di pompaggio, dell’entità massima di -1.3 metri e lievi innalzamenti in corrispondenza dei pozzi in immissione (+ 0.90 metri). Le differenze vengono praticamente annullate e la situazione imperturbata viene ripristinata durante le stagioni di inattività dell’impianto (primavera ed autunno). La piezometria corrispondente al termine di vita dell’impianto mantiene delle piccole differenze rispetto alla piezometria imperturbata, seppure corrisponda ad un periodo in cui l’impianto è spento. A tal proposito, in Figura 6.11 è riportato l’andamento nel tempo dei carichi idraulici calcolati in corrispondenza dei pozzi in pompaggio ed immissione e di due punti a valle e a monte idrogeologico corrispondenti ai piezometri esterni al sito Pz-6 e Pz-7. Si osserva che il “recupero” della condizione imperturbata non avviene al 100% dopo i vari cicli di accensione dell’impianto, bensì al 99.3 %. Durante i vari cicli il deficit di carico idraulico pari 0.7% presenta degli innalzamenti ed abbassamenti impercettibili, solo al termine di vita dell’impianto è possibile notare che dopo 227 giorni dall’ultimo spegnimento avviene il recupero totale delle condizioni iniziali (valore bianco).

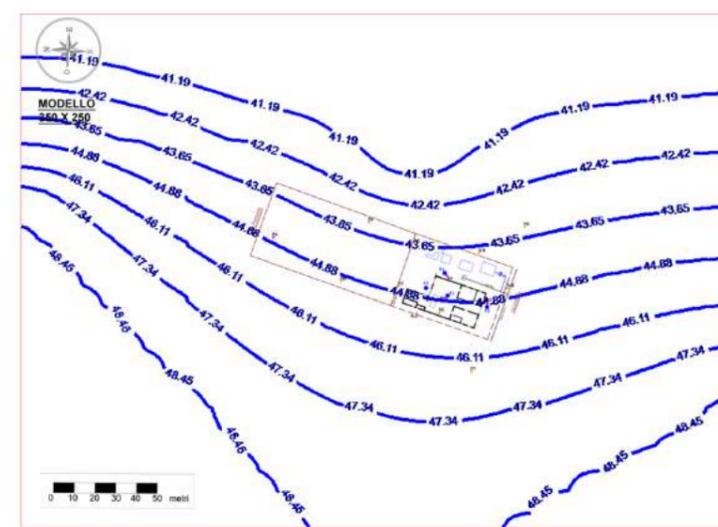
## MODELLO TRANSITORIO COMPLESSO ANDAMENTO NEL TEMPO DEL VALORE PIEZOMETRICO



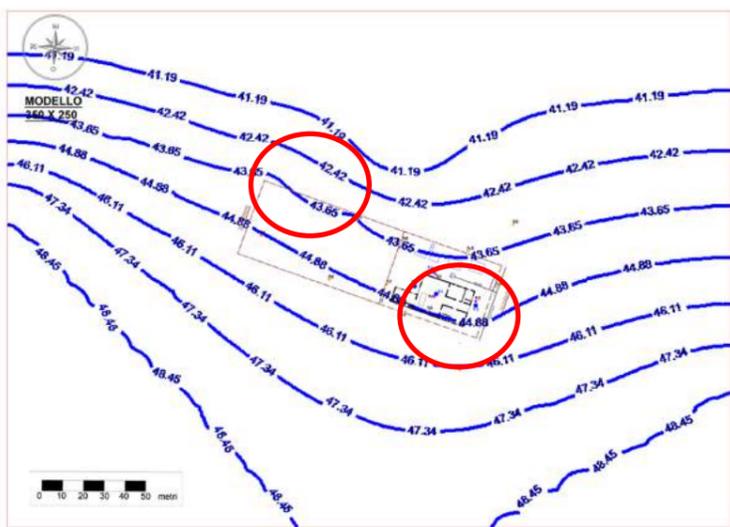
**a) TIME SERIES MODELLO:7300 giorni (20 anni)  
29/09/2010 (valore bianco)**



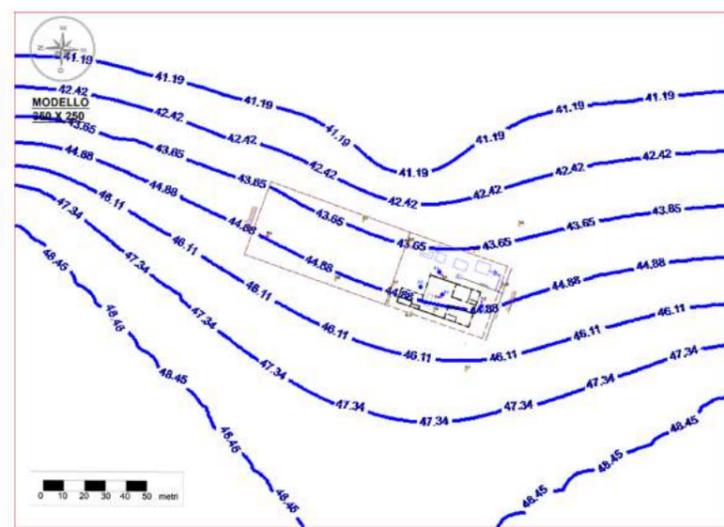
**b) TIME SERIES MODELLO:7316 giorni  
Impianto ATTIVO  
15/10/2010 (inizio riscaldamento)**



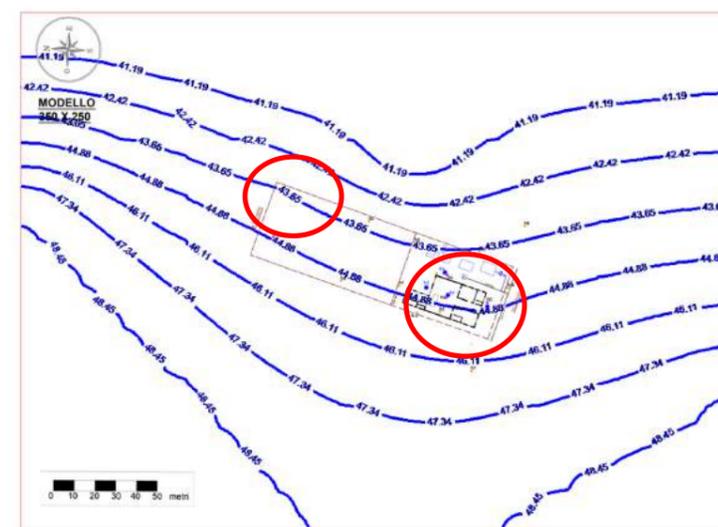
**c) TIME SERIES MODELLO:7498 giorni  
Impianto NON ATTIVO  
15/04/2011 (fine riscaldamento)**



**d) TIME SERIES MODELLO:7559 giorni  
Impianto ATTIVO  
15/06/2011 (inizio raffrescamento)**



**e) TIME SERIES MODELLO:7636 giorni  
Impianto NON ATTIVO  
31/08/2011 (fine raffrescamento)**



**f) TIME SERIES MODELLO: 14600 giorni  
Impianto NON ATTIVO  
29/09/2030 (termine vita utile impianto)**

*Figura 6.10: andamento nel tempo dei valori piezometrici. I cerchi in rosso indicano le variazioni piezometriche indotte dal pompaggio durante i vari cicli di accensione e spegnimento.*

In Figura 6.12 viene mostrato il bilancio di massa corrispondente agli stessi tempi utilizzati per le piezometrie di Figura 6.10. In questi grafici è possibile apprezzare, oltre alle variazioni di tutte le condizioni di flusso implementate, il comportamento del pompaggio durante i vari periodi invernali ed estivi. Anche in questo caso, i risultati del primo anno (gli unici mostrati) sono rappresentativi di ciò che accade fino all'ultimo anno di modellazione. I bilanci di massa, oltre a mostrare corrispondenza tra le portate in ingresso e in uscita, dimostrano come tutto il sistema idrico risulti compatibile con l'impianto oggetto di studio, in quanto non si verificano importanti disequilibri idrici nel lungo termine (cioè tutti i bilanci mostrano la corrispondenza tra *in* ed *out* totali). Pertanto, la configurazione di pompaggio determinata a partire dal modello stazionario permette di far operare l'impianto in modo sostenibile per un tempo di almeno 20 anni.

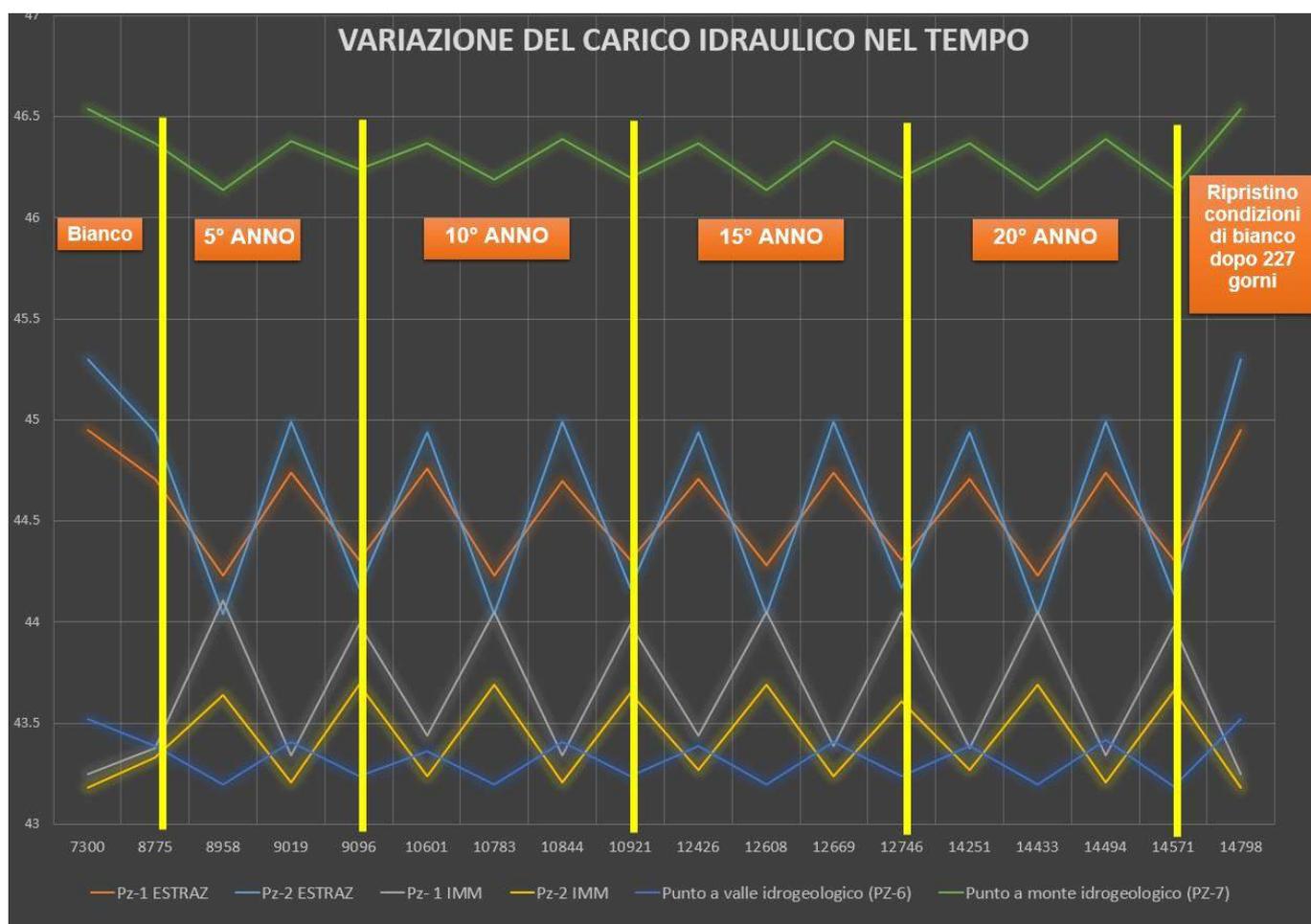


Figura 6.11: variazione del carico idraulico nel tempo.. (in formato A3)

## BILANCIO DI MASSA MODELLO TRANSITORIO COMPLESSO

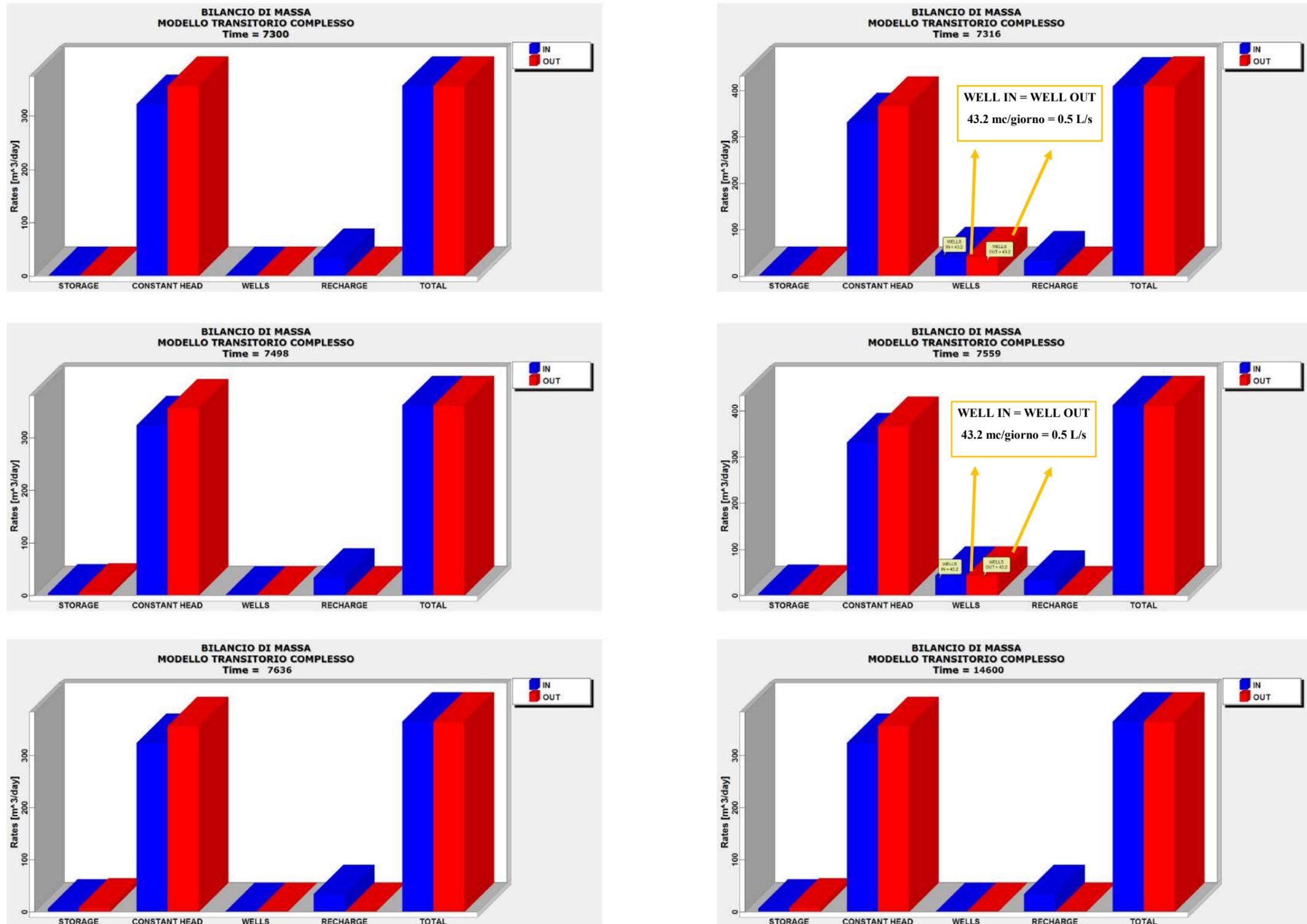


Figura 6.12: bilanci di massa del modello transitorio "complesso" riferito al primo anno di utilizzo e all'ultimo giorno di vita utile dell'impianto

### **6.2.2 Trasporto dei contaminanti ed effetti della bonifica**

Vengono mostrate in Figura 6.13 e 6.14 le mappe delle iso-concentrazioni ottenute dal modello transitorio complesso, riferite rispettivamente al TCE e al 1.1-DCE. In particolare, sono mostrati i risultati relativi ai seguenti momenti temporali dell'evoluzione dei due plume: a) la condizione di "bianco" corrispondente al giorno 7300 della simulazione (analoga a quelle già mostrate nel Par 6.1.3); b) la condizione dei plume dopo 5 anni dalla messa in funzione dell'impianto integrato; c) i plume dopo 10 anni dalla messa in funzione dell'impianto; d) i plume dopo 15 anni dalla messa in funzione dell'impianto; e) i plume dopo 20 anni dalla messa in funzione dell'impianto, corrispondente al termine di vita dell'impianto stesso.

Ricordando che gli obiettivi fissati per la bonifica della falda sotterranea effettuata nel 2010 (considerati anche in questo lavoro di tesi) prevedevano:

- L'abbassamento delle concentrazioni di Tricloroetilene e 1,1 dicloroetilene entro le CSR calcolate (rispettivamente pari a 151 µg/l e 2,07 µg/l), all'interno dei confini del sito.
- L'abbassamento delle concentrazioni di Organoalogenati, entro i valori delle Concentrazioni Soglia di Contaminazione previste dal D. Lgs. 152/2006 all'esterno del sito.

Di seguito vengono discussi e mostrati i rispettivi risultati relativi alla bonifica simulata.

#### Tricloroetile (TCE):

- Dopo 5 anni di utilizzo dell'impianto di bonifica si nota un drastico abbassamento dei valori di concentrazioni (fino a 250 µg/L di differenza rispetto alla condizione iniziale) e l'estensione della contaminazione relativa ai valori al di sopra delle CSR tende a concentrarsi all'interno del sito;
- Dopo i primi 5 anni il TCE tende a migrare e a concentrarsi principalmente in prossimità del PZ-2, con valori attorno ai 600 µg/L. Ciò perdura fino al ventesimo anno di attività dell'impianto (quarantesimo anno di modellazione). L'elevata concentrazione presso il PZ-2, evidenziata nelle mappe con il colore rosso, è dovuta principalmente all'elevata portata di estrazione applicata al pozzo, il quale è stato dimensionato per svolgere anche funzione di contenimento idraulico (al fine di minimizzare la migrazione della contaminazione al di fuori dei confini del sito);
- Dopo 10 anni di bonifica i valori all'interno del sito risultano inferiori alla CSR;
- Dopo 20 anni di bonifica i valori all'esterno del sito risultano superiori alle CSC imposte dal D. Lgs. 152/2006;

#### 1.1-Dicloroetilene (1.1 DCE):

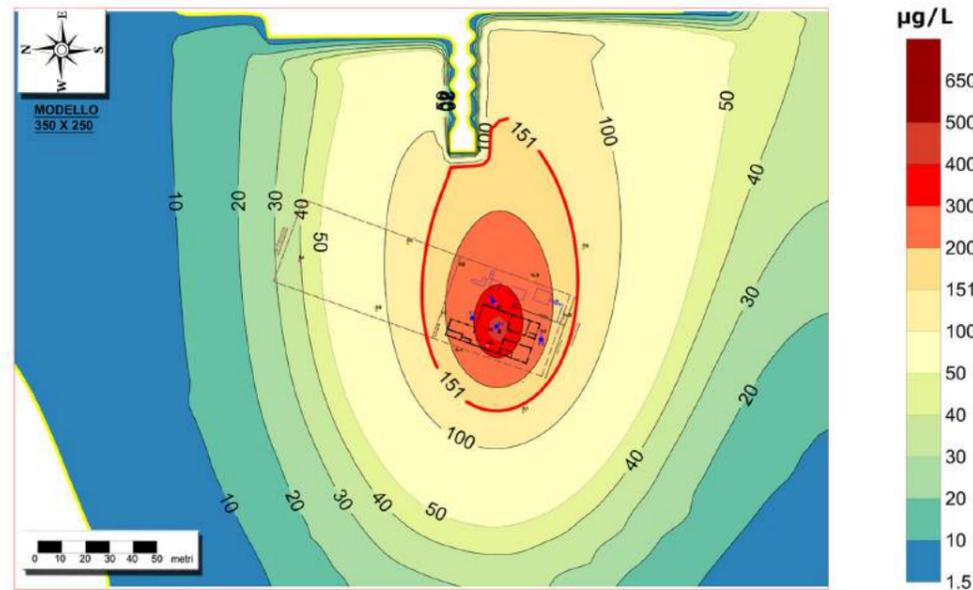
- Dopo 5 anni di utilizzo dell'impianto di bonifica si nota un drastico abbassamento dei valori di concentrazioni (fino a 14 µg/L di differenza rispetto alla condizione iniziale) e l'estensione della contaminazione relativa ai valori al di sopra delle CSR tende ad essere presente in buona parte ancora all'esterno del sito;
- Dopo i primi 5 anni l'1.1-DCE tende a migrare e a concentrarsi principalmente in prossimità del PZ-2, con valori attorno ai 22/23 µg/L. Ciò perdura fino al ventesimo

anno di attività dell'impianto (quarantesimo anno di modellazione). L'elevata concentrazione osservata al PZ-2 si può interpretare analogamente a come già descritto per il TCE.

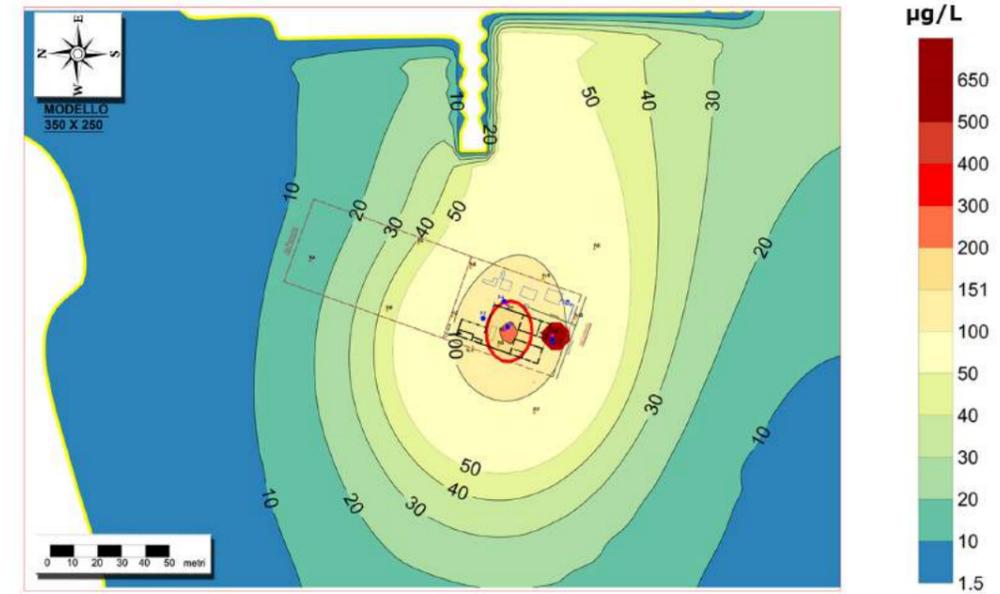
- Dopo 15 anni di bonifica i valori all'interno del sito risultano inferiori alla CSR;
- Dopo 20 anni di bonifica i valori all'esterno del sito risultano superiori alle CSC imposte dal D. Lgs. 152/2006;

In sintesi, nel caso di entrambi i contaminanti è possibile notare che: dopo i primi 5 anni di bonifica i contaminanti tendono a migrare e a concentrarsi con valori molto elevati in prossimità del pozzo di estrazione numero 2. Ciò è dovuto principalmente all'elevata portata di estrazione applicata a questo pozzo, il quale ha anche funzione di contenimento idraulico. Nel caso di entrambi i contaminanti, i valori al PZ-2 non mostrano alcun trend di decrescita nel tempo. Sarebbe quindi utile l'aggiunta, in questo punto, di un'ulteriore tipologia di intervento capace di abbattere le concentrazioni nell'immediato intorno del pozzo (es. tecniche di bonifica in grado di catalizzare le reazioni di degradazione dei contaminanti investigati). Escludendo l'immediato intorno del PZ-2 (per un raggio di 10 metri dal pozzo), l'obiettivo di bonifica fissato all'interno del sito (abbattimento delle concentrazioni al di sotto delle CSR) può ritenersi raggiunto dopo 15 anni di funzionamento dell'impianto integrato. Per quanto riguarda l'obiettivo di bonifica relativo all'esterno del sito (abbattimento delle concentrazioni al di sotto delle CSC) questo non viene apparentemente raggiunto entro il tempo di vita fissato per l'impianto. A tal proposito è importante ricordare due aspetti menzionati nei paragrafi e capitoli precedenti: 1) la modellazione della sorgente di contaminazione è stata "calibrata" principalmente per fornire risultati rappresentativi all'interno del sito, dove anche i punti di controllo delle concentrazioni (pozzi e piezometri) sono più abbondanti. Le concentrazioni ottenute all'esterno del sito sono quindi meno "affidabili", soprattutto a causa della carenza di punti di controllo esterni durante la fase di "calibrazione" della sorgente; 2) la modellazione di trasporto ha seguito un approccio cautelativo, non considerando la possibilità di degradazione dei contaminanti. Tali reazioni potrebbero giocare un ruolo significativo di abbattimento delle concentrazioni soprattutto nelle parti marginali del plume (ovvero quelle al di fuori del sito). Risulta quindi chiaro che, mentre le concentrazioni modellate all'interno del sito possono considerarsi caratterizzate da un buon grado di rappresentatività, lo stesso non si può dire per le concentrazioni esterne al sito, su cui insistono incertezze significativamente maggiori. Di conseguenza, il raggiungimento degli obiettivi di bonifica all'esterno del sito è di difficile valutazione con il presente modello, e non si può escludere un suo eventuale raggiungimento dopo i 20 anni di vita dell'impianto integrato. Tale incertezza si potrebbe ridurre tramite l'acquisizione di nuove informazioni utili ad una migliore modellazione della sorgente di contaminazione (es. valori di concentrazione nell'area esterna al sito e di informazioni più dettagliate sulla reale sorgente di contaminazione) e ad una migliore definizione della geologia ed idrogeologia locali.

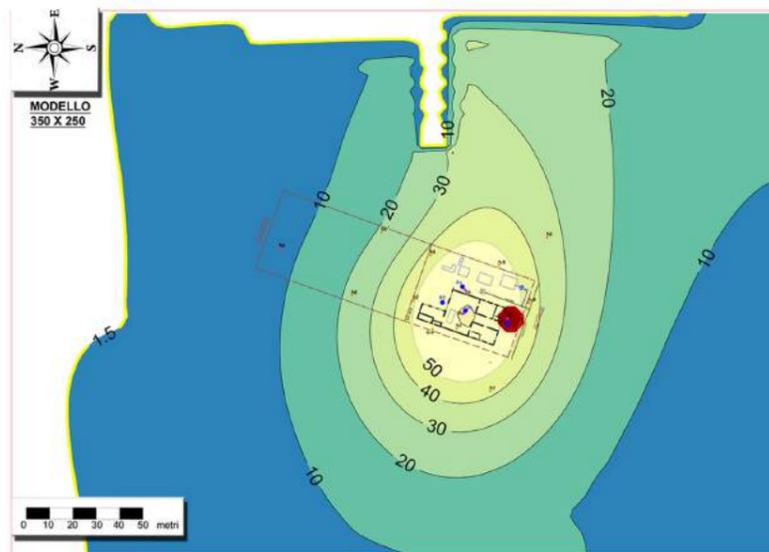
## TRICLOROETILENE (TCE) MODELLO TRANSITORIO COMPLESSO



**a) TIME SERIES MODELLO: 7300 giorni (20 anni)  
29/09/2010 (valore bianco)**



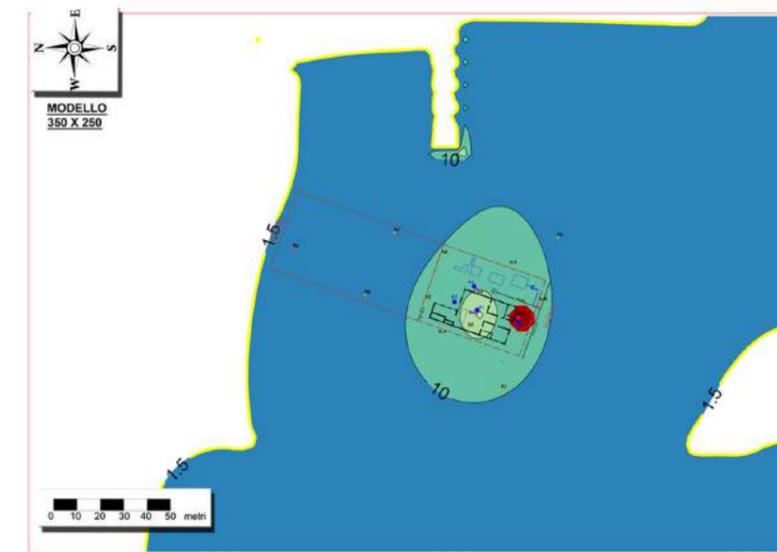
**b) TIME SERIES MODELLO: 9125 giorni (25 anni)  
DURATA BONIFICA + CLIMATIZZAZIONE: 5 anni**



**c) T. S. MODELLO: 10950 giorni (30 anni)  
DURATA B. + C. : 10 anni**



**d) T. S. MODELLO: 12775 giorni (35 anni)  
DURATA B. + C. : 15 anni**

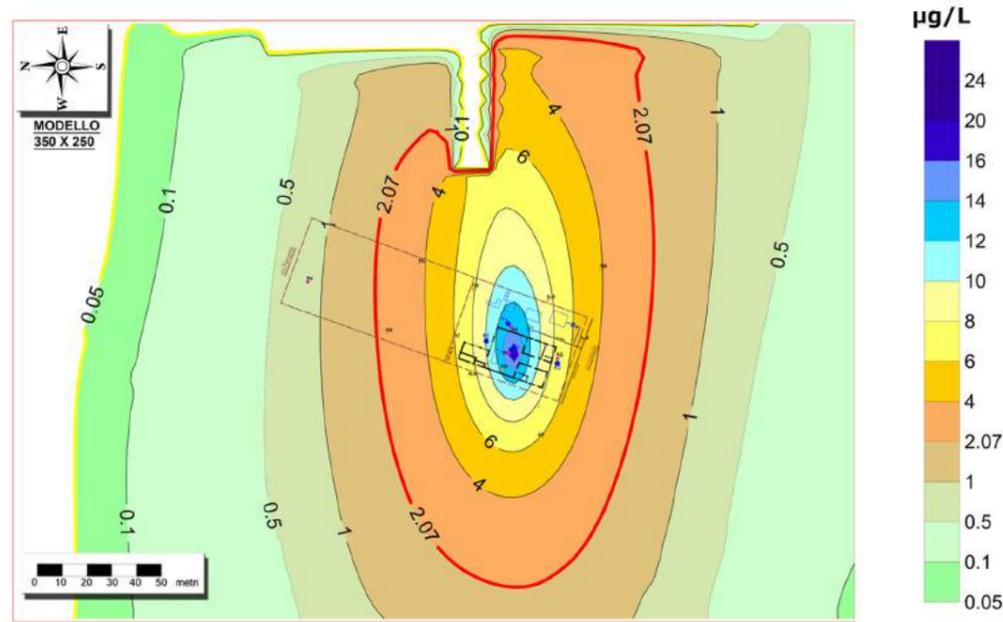


**e) T. S. MODELLO: 14600 giorni (40 anni)  
29/09/2030 (termine modello)  
DURATA B. + C. : 20 anni**

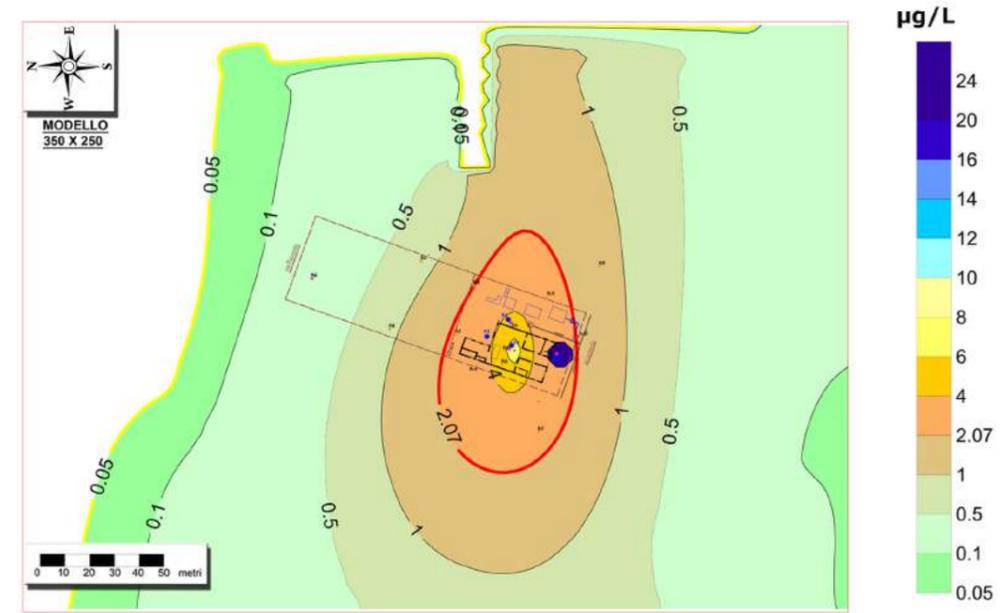
- isolinee di colore rosso indicano il valore limite delle CSR (concentrazioni soglia di rischio).  
CSR (TCE)=151 µg/L; CSR (1.1-DCE)= 2.07 µg/L
- isolinee di colore giallo indicano il valore limite delle CSC (concentrazioni soglia, D.lgs 152/2006).  
CSC (TCE)=1.5 µg/L; CSC (1.1-DCE)= 0.05 µg/L

*Figura 6.13: mappe delle iso-concentrazione relative al TCE ottenute dal modello transitorio "complesso"*

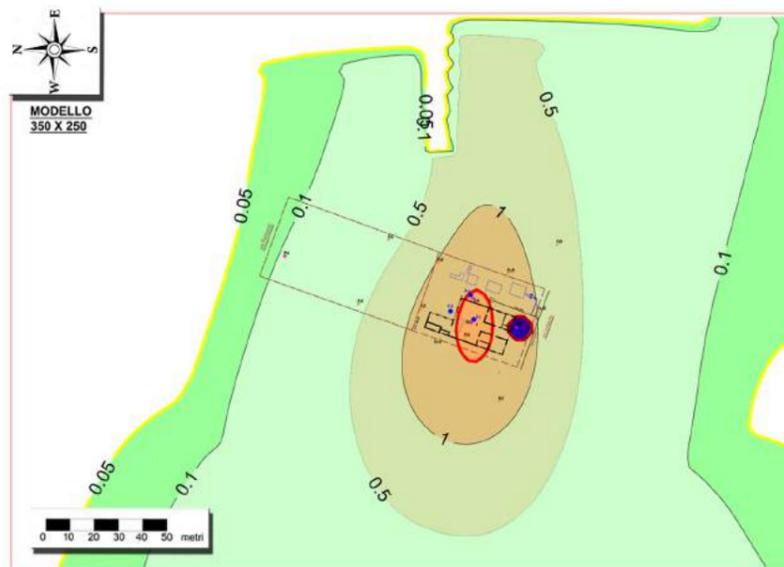
# 1.1-DICLOROETILENE(1.1-DCE) MODELLO TRANSITORIO COMPLESSO



**a) TIME SERIES MODELLO: 7300 giorni (20 anni)  
29/09/2010 (valore bianco)**



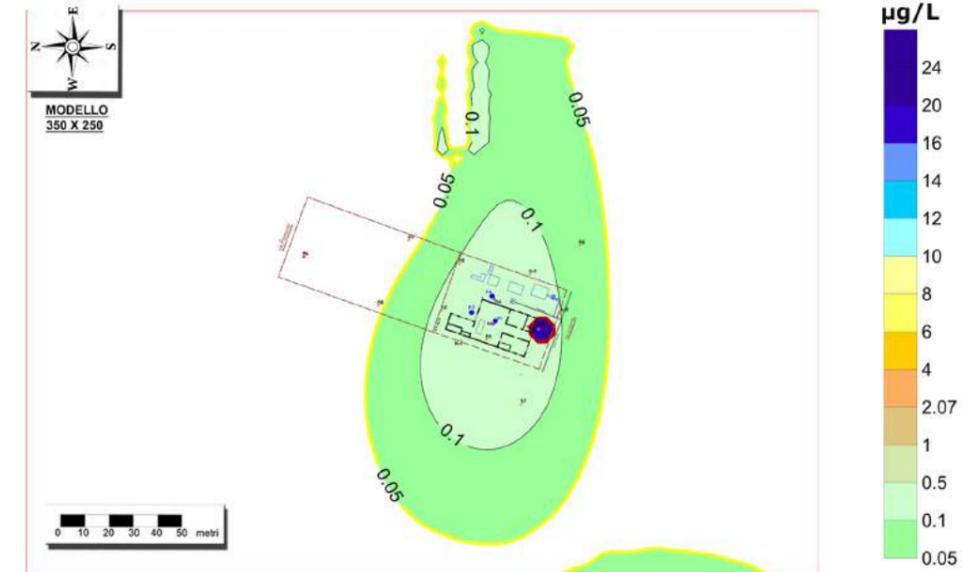
**b) TIME SERIES MODELLO: 9125 giorni (25 anni)  
DURATA BONIFICA + CLIMATIZZAZIONE: 5 anni**



**c) T. S. MODELLO: 10950 giorni (30 anni)  
DURATA B. + C. : 10 anni**



**d) T. S. MODELLO: 12775 giorni (35 anni)  
DURATA B. + C. : 15 anni**



**e) T. S. MODELLO: 14600 giorni (40 anni)  
29/09/2030 (termine modello)  
DURATA B. + C. : 20 anni**

— isolinee di colore rosso indicano il valore limite delle CSR (concentrazioni soglia di rischio), CSR (TCE)=151 µg/L;  
 CSR (1.1-DCE)= 2.07 µg/L.  
— isolinee di colore giallo indicano il valore limite delle CSC (concentrazioni soglia, D.lgs 152/2006), CSC (TCE)=1.5  
 µg/L; CSC (1.1-DCE)= 0.05 µg/L.

Figura 6.14: mappe delle iso-concentrazione relative al 1.1-DCE ottenute dal modello transitorio "complesso"

### 6.3 CALCOLO DELLA POTENZA DELL'IMPIANTO GEOTERMICO

Il modello stazionario ha permesso di definire la portata massima sfruttabile nel sito oggetto di studio (Par 6.1.2) valore fondamentale per il dimensionamento di un impianto geotermico di tipo *open loop*. Il calcolo della potenza dell'impianto integrato e della superficie climatizzabile è stato effettuato come descritto nel Paragrafo (Cap. 3), utilizzando i seguenti dati di input:

- Portata di estrazione e di immissione  $\rightarrow 0.5$  L/s (*definita attraverso il modello stazionario*)
- $\Delta T$  (*salto termico considerato*) =  $3^{\circ}\text{C}$
- $c_p$  (*calore specifico a pressione costante, in funzione della temperatura*) =  $4.187$  kJ/(kg  $^{\circ}\text{C}$ )
- COP (*coefficiente di performance*) =  $5$
- $h$  (*altezza vani considerata*) =  $3$
- $k$  (*residenziale/civile*) =  $24$  W/m<sup>3</sup> (GUADAGNI, 2010)

*Per maggiori dettagli in merito ai parametri di input si rimanda al paragrafo 5 del Capitolo 3.*

Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

1.  $P_e$  (*potenza termica richiesta all'evaporatore*) =  $\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = 6.28$  kW
2.  $F_T$  (*fabbisogno termico*) =  $P_e \cdot \left(\frac{\text{COP}}{\text{COP}-1}\right) = 7.85$  kW  $\rightarrow 7850$  W
3.  $A$  (*sup. ipotetico edificio*) =  $F_T/(k \cdot h) = 109,36$  m<sup>2</sup>

Seguendo la procedura illustrata nel Paragrafo 5 (Cap. 3) è stato quindi stimato che, considerando una portata di 0.5 L/s in estrazione e in immissione, risulta possibile climatizzare con una pompa di calore da 8 kW un edificio civile/residenziale (con altezza dei vani pari a 3 metri) che copre una superficie massima di circa 110 m<sup>2</sup>.

## 6.4 ANALISI DEI COSTI

Grazie alla collaborazione dello staff di Geo-Net s.r.l. è stato possibile elaborare un'analisi dei costi dell'impianto oggetto di studio. L'obiettivo principale di questa analisi è quello di valutare il risparmio economico che si otterrebbe utilizzando l'impianto integrato oggetto di studio rispetto ad una soluzione tradizionale. Le modalità con cui è stata condotta l'analisi sono descritte nel Paragrafo 6 (Cap. 3). La tabella 6.15 mostra tutti i costi relativi agli investimenti iniziali e alle spese di gestione dei rispettivi impianti. Utilizzando la formula per la valutazione dei costi relativi alla realizzazione (investimenti iniziali) e gestione delle due tipologie di impianto (tradizionale e integrato), illustrata nel Paragrafo 6 (Cap. 3), sono stati ottenuti i risultati mostrati in 6.16.

IMPIANTO TRADIZIONALE			IMPIANTO INTEGRATO		
INVESTIMENTO INIZIALE CLIMATIZZAZIONE TRADIZIONALE ( $I_{clT}$ )			INVESTIMENTO INIZIALE IMPIANTO GEOTERMICO ( $I_{clG}$ )		
UNITÀ DELL' IMPIANTO	QUANTITÀ	COSTO (€)	UNITÀ DELL' IMPIANTO	QUANTITÀ	COSTO (€)
Caldaie	1	2500	Pompa di calore	1	5000
Gruppi frigo	1	2500	Fancoil	5	5000
Fancoil	5	5000			
TOT ( $I_{cl}$ ) =		10000	TOT ( $I_{clG}$ ) =		10000
INVESTIMENTO INIZIALE IMPIANTO DI BONIFICA ( $I_b$ )			INVESTIMENTO INIZIALE IMPIANTO DI BONIFICA ( $I_b$ )		
UNITÀ DELL' IMPIANTO	QUANTITÀ	COSTO (€)	UNITÀ DELL' IMPIANTO	QUANTITÀ	COSTO (€)
Pozzi	4	7000	Pozzi	4	7000
Piezometri	14	10000	Piezometri	14	10000
Pump & Treat	1	23000	Pump & Treat	1	23000
TOT ( $I_b$ ) =		40000	TOT ( $I_b$ ) =		40000
COSTI DI GESTIONE (in €)			COSTI DI GESTIONE (in €)		
TIPOLOGIA DI SOLUZIONE	BONIFICA ( $CG_b$ )	C.G. CLIMATIZZAZIONE ( $CG_{cl}$ )	TIPOLOGIA DI SOLUZIONE	BONIFICA ( $CG_b$ )	C.G. CLIMATIZZAZIONE ( $CG_{cl}$ )
Tradizionale	21200	5000	Pump & Treat + Geotermico	21200	500

Tabella 6.15: tabella riassuntiva con tutti i costi relativi alle due soluzioni di condizionamento e bonifica (tradizionale ed integrata).

I risultati della modellazione mostrano come la bonifica può considerarsi terminata all'interno del sito dopo 15 anni in quanto le concentrazioni dei contaminanti risultano al di sotto delle CSR. Mentre all'esterno del sito dopo 20 anni di bonifica i valori risultano superiori alle CSC imposte dal D. Lgs. 152/2006.

La Figura 6.16 mette assieme e confronta tutti i costi relativi dei due impianti, considerando la durata della bonifica del sito pari a 15 anni. Dal grafico è possibile fare le seguenti osservazioni:

- l'investimento iniziale è pari a 50,000.00 € per tutte e due le soluzioni;
- l'impianto integrato produce un progressivo risparmio economico fino al termine della bonifica (anno 15), che tende a stabilizzarsi negli ultimi 5 anni;
- l'ammortamento dell'impianto di climatizzazione avviene dopo 4 anni;

- l'ammortamento totale avviene in 13 anni. In particolare, il risparmio ottenuto dopo 13 anni è pari a 50,000.00 €. Questo permette di recuperare i costi relativi agli investimenti iniziali per la realizzazione dell'impianto integrato di bonifica e di climatizzazione;
- il risparmio lordo al termine dei 20 anni è pari a 85,500.00 € rispetto al caso di impianti tradizionali. Detraendo l'ammortamento si ottiene un risparmio netto pari a 35,500.00 €;
- il risparmio è dovuto principalmente ai costi di gestione dell'impianto geotermico *open-loop*, inferiori rispetto a quelli di impianti di condizionamento tradizionali.

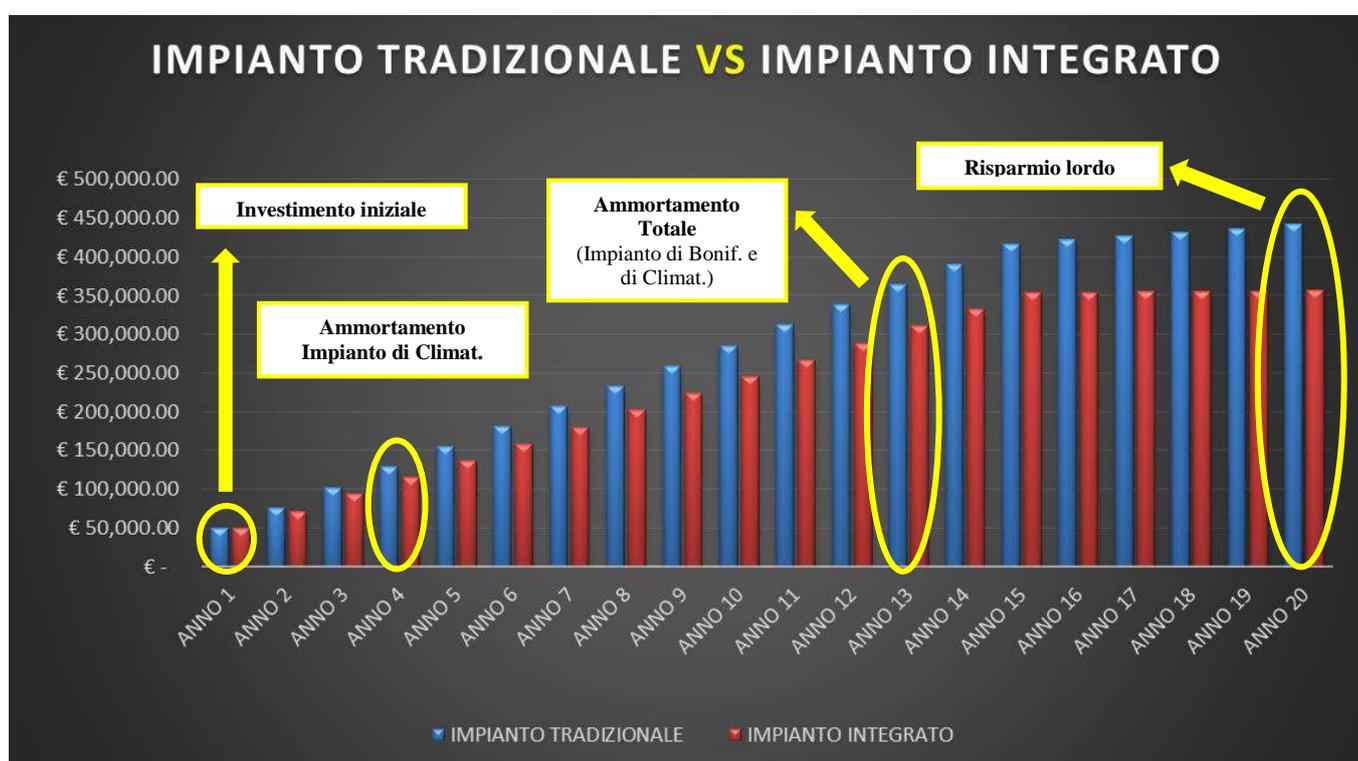


Figura 6.16: confronto dei costi sostenuti tra un impianto tradizionale e l'impianto integrato oggetto di studio.

## 7.CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi è stata condotta una sperimentazione teorica attraverso l'utilizzo di modelli numerici di flusso e di trasporto, con l'obiettivo di valutare l'efficacia di un possibile impianto integrato di climatizzazione (geotermia a bassa entalpia *open loop*) e bonifica di una falda contaminata (tramite *Pump and Treat*). Il sito selezionato per la sperimentazione è ubicato in via Lombardia, nell'area industriale di Ozzano dell'Emilia (Bologna), ed è definito "Ex stabilimento Ot-Gal". Si tratta di una galvanotecnica con trattamento di metalli, dismessa alla fine degli anni '90 in cui è stata riscontrata una severa contaminazione di solventi clorurati, in particolare Tricloroetilene (TCE) e 1.1-Dicloroetilene (1.1-DCE). L'implementazione del modello numerico di flusso e trasporto si è basata su dati pregressi, raccolti durante campagne di indagine condotte nel sito dalla ditta Geo-Net s.r.l., tra il 2005 ed il 2011. La modellazione numerica (basata sul codice di calcolo MODFLOW ed altri codici ad esso associati, quali MT3DMS e MODPATH) ha permesso di investigare la possibilità di integrare in un unico impianto due tecnologie utilizzate per scopi differenti: un impianto di climatizzazione geotermico a bassa entalpia di tipo *open-loop* ed un impianto di bonifica delle acque di falda di tipo *Pump and Treat*. Per simulare numericamente l'impianto integrato oggetto di studio e la sua interazione con il flusso e la contaminazione della falda, sono stati realizzati 3 modelli (stazionario, transitorio "semplificato" e transitorio "complesso") a complessità crescente. Inoltre è stata elaborata un'analisi dei costi al fine di valutare il risparmio economico che si otterrebbe utilizzando l'impianto integrato oggetto di studio rispetto a due impianti tradizionali separati di condizionamento e bonifica.

I risultati ottenuti nel presente studio possono venire così schematizzati:

- ❖ È stato possibile definire uno schema di pompaggio ottimale per l'impianto integrato, che mostra una sostenibilità accettabile nel tempo (recupero del 99.3 % delle condizioni di bianco ad ogni ciclo di accensione e spegnimento). La portata di estrazione massima sfruttabile nel sito oggetto di studio è pari a 0.5 L/s (30 L/min);
- ❖ L'assenza di fenomeni di corto-circuitazione termica è stata verificata utilizzando il codice di calcolo MODPATH. In base ai risultati ottenuti, anche dopo un periodo di 20 anni (vita standard di un impianto di climatizzazione) l'acqua reiniettata in falda non torna mai ai pozzi di prelievo;
- ❖ Dopo i primi 5 anni di bonifica, i contaminanti (TCE e 1.1-DCE) tendono a concentrarsi con valori molto elevati in prossimità del pozzo di estrazione numero 2. I valori al PZ-2 non mostrano alcun trend di decrescita nel tempo. Sarebbe quindi utile l'aggiunta, in questo punto, di un'ulteriore tipologia di intervento capace di abbattere le concentrazioni nell'immediato intorno del pozzo (es. tecniche di bonifica in grado di catalizzare le reazioni di degradazione dei contaminanti investigati).
- ❖ Escludendo l'immediato intorno del PZ-2 (di raggio pari a 10 metri), l'obiettivo di bonifica fissato all'interno del sito (abbattimento delle concentrazioni al di sotto delle CSR) può ritenersi raggiunto dopo 15 anni di funzionamento dell'impianto integrato.
- ❖ L'obiettivo di bonifica relativo all'esterno del sito (abbattimento delle concentrazioni al di sotto delle CSC) non viene apparentemente raggiunto entro il tempo di vita fissato per l'impianto. È comunque necessario sottolineare che i risultati ottenuti tramite la modellazione sono da considerarsi maggiormente rappresentativi all'interno del sito, rispetto all'esterno dello stesso, come discusso nel testo.

- ❖ Lo schema di pompaggio adoperato permette l'installazione di una pompa di calore con potenza pari a circa 8 kW, sfruttabile per il condizionamento di un ipotetico edificio a destinazione residenziale/civile disposto su unico livello di superficie calpestabile pari a circa 110 mq;
- ❖ L'analisi dei costi ha permesso un confronto economico tra un impianto tradizionale e l'impianto integrato oggetto di studio, basata su 20 anni di utilizzo (vita standard di un impianto di climatizzazione). Il risparmio lordo al termine dei 20 anni è pari a 85,500.00 € rispetto al caso di impianti tradizionali. Detraendo l'ammortamento totale che avviene in 13 anni, si accumula nei restanti 7 anni un risparmio netto pari a 35,500.00 € rispetto ad un sistema tradizionale.

In estrema sintesi, l'impianto investigato mostra una potenziale buona efficacia sia dal punto di vista del condizionamento geotermico che della bonifica degli organoclorurati, fornendo anche un significativo risparmio economico rispetto alle soluzioni tradizionali.

È comunque necessario sottolineare che, a causa principalmente della significativa variabilità litologica ed idrogeologica dell'area e delle scarse informazioni riguardo alla sorgente di contaminazione ed alla sua estensione spaziale, il modello realizzato riproduce in modo necessariamente molto schematico e semplificato la realtà geologica ed idrogeologica investigata. In tal senso, l'acquisizione di nuove informazioni di carattere geologico, idrogeologico e geochimico, e la loro integrazione nel modello presentato (tramite il processo di *post audit*), permetterebbe un significativo miglioramento dell'analisi condotta nella presente tesi.

Sono di seguito elencate tre ipotetiche linee di studio future, basate sempre su modelli numerici, che permetterebbero di migliorare l'analisi dell'efficacia dell'impianto integrato qui proposto, e di estenderla ad altre scale:

1. Valutare l'efficacia dell'impianto integrato in altri siti, in contesti idrogeologici più "favorevoli" rispetto a quello qui investigato (a maggior conducibilità idraulica e minor eterogeneità), che permettano anche l'applicazione di portate di estrazione e di immissione maggiori rispetto al sito di studio, in modo da utilizzare l'impianto con pompe di calore più potenti. ;
2. Affinare l'analisi relativa alla massa di contaminante estratta dal sistema, in modo da ottimizzare il trattamento dei contaminanti (es. dimensionamento e sostituzione dei filtri a carboni attivi) in base agli output del modello. (Nella presente tesi non è stata effettuata una stima della massa di contaminante estratta dal sistema poiché l'interfaccia grafica utilizzata presentava varie limitazioni in tal senso);
3. Valutare l'utilizzo dell'impianto integrato proposto non soltanto in situazioni locali, ma anche a scale più grandi. In particolare, sarebbe interessante considerare aree di maggiori dimensioni (città, aree industriali) contaminate, e simulare, sempre attraverso l'utilizzo di modelli numerici, la presenza di più impianti integrati collocati in aree di interesse strategico (scuole, ospedali, edifici pubblici) inseriti in una rete di teleriscaldamento, con l'obiettivo di abbattere/ridurre i costi energetici, ridurre la richiesta di energie fossili e proteggere e/o bonificare eventuali acquiferi contaminati.

## **BIBLIOGRAFIA**

- AMOROSI A., CAPORALE L., CIBIN U., COLALONGO M.L., PASINI G., RICCI LUCCHI F., SEVERI P. & VAIANI S.C. (1998b). *The Pleistocene littoral deposits (Imola Sands) of the northern Apennines foothills. Giornale di Geologia*, 60, 83-118;
- AMOROSI A., PRETI D., SEVERI P. & MARTELLI L., (2009). *Carta Geologica D'Italia alla scala 1:50000, Foglio 221 – Bologna. Servizio Geologico d'Italia – Regione Emilia-Romagna.*
- AMOROSI A., PRETI D., SEVERI P. & MARTELLI L., (2009). *Progetto Carg, Note illustrative, Foglio 221 – Bologna. Servizio Geologico d'Italia – Regione Emilia-Romagna;*
- ANDERSON M. P., WOESSNER W.W. (1991). *Applied groundwater modelling: simulation of flow and advective transport, Academic Press*
- APAT, (2007). *Parametri di input per l'elaborazione delle analisi di rischio sito-specifica ai sensi del D.Lgs. 152/2006, Roma.*
- ARPA EMILIA-ROMAGNA, (2004). *Ambiente e Salute. Annuario regionale dei dati ambientali, 438-439.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2007), SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO, *Annale Idrologico.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2008), SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO, *Annale Idrologico.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2009), SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO, *Annale Idrologico.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2010), SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO, *Annale Idrologico.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2011), SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO, *Annale Idrologico.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2012), SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO, *Annale Idrologico.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2013), SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO, *Annale Idrologico.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (2014), SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO, *Annale Idrologico*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA, (2009). *Implementazione della direttiva 2000/60/CE. Allegato 2: Tipizzazione, caratterizzazione ed individuazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei, prima individuazione delle reti di monitoraggio.*
- ARPA REGIONE EMILIA-ROMAGNA, ASSESSORATO AMBIENTE, (2008). *Rete Regionale di Monitoraggio delle acque sotterranee, Relazione Annuale 2008, Relazione triennale 2006-2008.*
- ARPA, (2011). *Geotermia: aspetti tecnici e risvolti ambientali di una importante risorsa energetica rinnovabile, Sezione provinciale di Bologna, servizio sistemi ambientali.*

- ARPAE, (2015). *Rete Regionale per la qualità ambientale: acque sotterranee*.
- BARANI S., (2014). *Geotermia: come condizionare la casa in modo tecnologico ed ecosostenibile, OGER (commissione idrogeologica), SAIE-2014, Bologna*.
- BASTA S., MINCHIO F., (2008), *Geotermia e pompe di Calore, Editore Associazione Geotermia.org*.
- BERTI M., GARGINI A., FILIPPINI M., (2014). *slide del corso di modellazione geologico tecnica e idrogeologica, Università di Bologna*.
- BOCCIOCCHI, (2013), *Pump & Treat – Barriere idrauliche, Università di Roma Tor Vergata*.
- BOUWER, H. AND R. C. RICE (1976). "A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells." *Water Resources Research* **12**(3): 423-428.
- BRADLEY PM. ,(2003). *History and ecology of chloroethene biodegradation: A review. Bioremediation J* 7:81–109.
- BRUGIONI M., CONSUMI F., MAZZANTI B., MENDUNI G., MONTINI G., (2008). *Determinazione dell'infiltrazione efficace alla scala di bacino finalizzata alla individuazione delle aree a diversa disponibilità di risorse idriche sotterranee, Conferenza: Stato del territorio e delle risorse naturali in Toscana, Firenze*.
- BURRATO P, CIUCCI F AND VALENSISE G, (2003). *An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active Blind thrust faulting. Annals of Geophysics* 46: 865–882.
- C. W. THORNTHWAITTE (1948), *An Approach toward a Rational Classification of Climate, Geographical Review, Vol. 38, No. 1. (Jan., 1948), pp. 55-94*
- CASASSO A., SETHI R., (2013). *Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia Geoingegneria Ambientale e Mineraria, Anno L, n. 1, aprile 2013, 13-22*
- CASASSO A., SETHI R., (2015). *Modelling thermal recycling occurring in Groundwater Heat Pumps (GWHPs), Renewable Energy, vol. 77, pp. 86-93. - ISSN 0960-1481*
- CELICO.P (1988) - *Prospezioni idrogeologiche. Volume I, Liguori Editore, Napoli*.
- CENCETTIC., DE ROSA P., FREDDUZZI A., MARCHESINI I., (2007). *I processi di interpolazione spaziale nella ricostruzione della superficie piezometrica. Un'applicazione all'acquifero alluvionale dell'Alta Valtiberina, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Giornale di Geologia Applicata* 6 (2007) 17-32.
- CERBINI G., GORLA M.,(2009). *Idrogeologia applicata – Principi, metodi e misure, Geo-Impianti, Segrate, 2° edizione;*
- CESARI G., (2012). *WORKSHOP Geotermia a bassa entalpia: nuova opportunità e ruolo del geologo, Chieti*.
- COHEN R.M., MERCER J.W., GREENWALD R.M., BELJIN M.S., (1997). *Design guidelines for conventional pump-and-treat systems, EPA/540/S-97/504, Office of solid Waste and Emergency Response, Washigton D.C.;*
- COLALONGO M.L., RICCI LUCCHI F. ET AL., (1982). *Il Plio-Pleistocene del Santerno (Appennino romagnolo). In: Guida alla geologia del margine appenninico-*

- padano, G.CREMONINI & F.RICCI LUCCHI cur., Soc.Geol.It.,Guide Reg.,Bologna, 161-166.
- COONEY D.O. (1999). *Adsorption design for wastewater treatment*. CRC Press LLC;
  - CREMASCHI M., GASPERI G., (1989). *L'alluvione altomedievale di Mutina, in rapporto alle variazioni ambientali Oloceniche*. Memorie della Società Geologica Italiana, 42, pp.179-180;
  - DAVID M. C., MICHELLE M. S., (2010). *Chlorinated solvent chemistry: structures, nomenclature and properties*, University of California, University of Iowa, Springer;
  - DOUGLAS M. MACKAY AND JOHN A. CHERRY, (1989). *Groundwater contamination: pump-and-treat remediation Environmental Science & Technology* 23 (6), 630-636
  - E. MILNES, P. PERROCHET, (2013). *Assessing the impact of thermal feedback and re cycling in open-loop groundwater heat pump (GWHP) systems: a complementary design tool*, Hydrogeology Journal, vol. 21 (2013), pp. 505-514
  - FARINA M. MARCACCIO M., ZAVATTI A. (2014). *Esperienza e prospettive nel monitoraggio delle acque sotterranee*, Pitagora Editrice, Bologna;
  - FETTER, C.W. (1999). *Contaminant Hydrogeology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
  - FETTER, C.W., (1994). *Applied Hydrogeology, 3rd ed.* Macmillan College Publishing, Inc., New York, 616 p
  - FILIPPINI M., STUMPP C., NIJENHUIS I., RICHNOW H. H., GARGINI A., (2015). *Evaluation of aquifer recharge and vulnerability in an alluvial lowland using environmental tracers*.
  - FROLDI P., (2013), *Impianti geotermici – Progettazione, realizzazione e controllo*, Maggioli editore.
  - GELHAR, L.W., WELT, C. AND REHFELDT, K.R. (1992). *A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers*. *Water Resources Research*, 28, 1955–1974.
  - GEO-NET s.r.l., (2005-2013). *Progetto di Bonifica Ex OT-GAL, Imola*.
  - GEO-NET s.r.l., (2008). *Progetto di Bonifica Ex OT-GAL, Analisi di Rischio sito-specifica, Imola*.
  - GOLDEN SOFTWARE, INC. (2014). *User's Guide Surfer 12, Powerful Contouring, Gridding, and Surface Mapping*, 809 14<sup>th</sup> Street, Golden, Colorado 80401-1866, U.S.A.
  - GOTTARDI G., (1978). *I minerali*, Bollati Boringhieri
  - GRASSI M., (2010), *Rimozione di contaminanti emergenti dalle acque reflue mediante adsorbimento*.
  - GUADAGNI A., (2010), *Prontuario dell'Ingegnere*, Hoepli, Milano
  - HANS F. STROO, C. HERB WARD, (2010). *In Situ Remediation of Chlorinated Solvent Plumes*, Springer;
  - HANS F. STROO, C. HERB WARD, (2010). *In Situ Remediation of Chlorinated Solvent Plumes*, Springer.

- HARBAUGH A.W., BANTA ER, HILL M.C., MCDONALD M.G, (2000). *MODFLOW-2000, The US Geological Survey modular ground-water model - User Guide to modularization concepts and the ground-water flow process. US Geological Survey, Reston, VA, p 121.*
- HARBAUGH, A.W., (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.*
- HARBAUGH, A.W., AND MCDONALD, M.G., (1996). *User's documentation for MODFLOW-96 an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 96-485, 56 p.*
- JAMES S. WALKER, (2010), *Fondamenti di Fisica, Pearson.*
- KAVANAUGH S., RAFFERTY K., (2014). *Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.*
- M. BRUGIONI, F. CONSUMI, B. MAZZANTI, G. MENDUNI, G. MONTINI, (2008). *Determinazione dell'infiltrazione efficace alla scala di bacino finalizzata alla individuazione delle aree a diversa disponibilità di risorse idriche sotterranee, Autorità di Bacino del fiume Arno, Firenze.*
- M. CIVITA, (2005). *"Idrogeologia applicata ed ambientale", Ambrosiana*
- M. DONINELLI, (1994). *I circuiti e i terminali degli impianti di climatizzazione, Quaderni Caleffi, Fontaneto d'Agogna, Novara*
- MACKAY D, SHIU WY, MA KC., (1993). *Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals. Lewis Publishers, Chelsea, MI, USA.*
- MCDONALD, M.G., AND HARBAUGH, A.W., (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1, 586 p.*
- PAHUD D., GENERELLI M., (2002), *Misure di un impianto di riscaldamento con sonde geotermiche a Lugano (TI), Laboratorio Energia Ecologia ed Economia, DCT, SUPSI, Centre Universitaire d'Etude des Problemes de l'Energie, Università de Geneve, CH;*
- PANKOW JF, CHERRY JA, (1996). *Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior, and Remediation. Waterloo Press, Portland, OR, USA. 525 p*
- PASSAGLIA E., (2008), *Zeoliti naturali Zeoliti e loro applicazioni, Arvan.*
- PASSAGLIA E., MARCHI E., AZZOLINI P., BARBIERI L., BEDOGNI G., MANFREDI F., (1998a), *Zeoliti nella depurazione di percolato da discarica e loro utilizzo in floricoltura. Noi & L'ambiente, 56/57, 34-37.*
- PASSAGLIA E., MARCHI E., DI LORENZO A., (1999a), *Proprietà tecnologiche di zeoliti italiane nella rimozione di NH<sub>4</sub> da reflui civili ed industriali. Quaderni di Geologia Applicata, 6, 35-45.*
- PASSAGLIA E., VEZZALINI G, CARNEVALI R., (1990), *Diagenetic chabazites and phillipsites in Italy: crystall chemistry and genesis. Eur. J. Mineral, 2, 827-839.*

- PICCININI L., VINCENZI V., PONTIN A., TONET F. (2012). *Modello di trasporto di calore per il dimensionamento di un sistema di geoscambio a circuito aperto, Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater (2012) - AS03011: 067 – 079*
- POLLOCK, D.W., (1994). *User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, version 3: A particle-tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-464, 249 p*
- POLLOCK, D.W., (2012). *User Guide for MODPATH Version 6 — A Particle-Tracking Model for MODFLOW, Chapter 41 of Section A, Groundwater Book 6, Techniques and Methods 6-A41, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey*
- PRANZINI G., (2009), *Le acque sotterranee, elementi di idrologia e casi di studio, Pitagora Editrice Bologna.*
- PROVINCIA DI VARESE, *L'utilizzo della risorsa idrica sotterranea a fini geotermici nella Provincia di Varese, linee guida per impianti a circuito aperto a bassa entalpia, Settore ecologie e ambiente;*
- RAFFERTY K., (2001). *Design Aspect of commercial open loop heat pump system, GHC Bulletin;*
- REGIONE EMILIA ROMAGNA, (1999). *Carta Geologica di pianura dell'Emilia Romagna scala 1:250000. Bologna*
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP (1998), *Riserve idriche sotterranee della regione Emilia Romagna. A cura di G. DI DIO. S.EL.CA. Firenze, 120 p.*
- RICCI LUCCHI F., COLALONGO M.L., CREMONINI G. ET AL., (1982). *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico. In: Guida alla geologia del margine appenninico padano, a cura di G.Cremonini & F.Ricci Lucchi., Soc.Geol.It.,Guide Reg.,Bologna, 17-46.*
- SPITZ K., MORENO J. (1996). *A practical guide to groundwater and solute transport modelling, Wiley*
- U. MOISELLO (1998), *Idrologia tecnica, La Goliardica Pavese.*
- UNIONE GEOTERMICA ITALIANA, (2007), *La geotermia di ieri, oggi, domani, in collaborazione con il Consiglio Nazionale dei Geologi, Geologia Tecnica ed Ambientale, allegato al n. 1-2/2007, ed. ETS, Pisa.*
- VEGGIANI A. (1994). *I deterioramenti dell'età del ferro e dell'alto medioevo. Bollettino della società Torricelliana di Scienze e Lettere, Faenza, 45, 3-80.*
- WEISHAUPT GMBH, (2010), *Manuale per la progettazione e l'installazione – Pompe di calore WWPT, Germania.*
- XU M., ECKSTEIN Y., (1995). *Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and scale , Ground Water, vol.33, n. 6, Worthington, Ohio;*
- ZHENG C., WANG P.P., (1999). *MT3DMS: a modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. Contract Report SERDP-99-1.*

- ZHENG, CHUNMIAO, (1990). *MT3D, A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, Report to the U.S. Environmental Protection Agency, 170 p.*
- ZHENG, CHUNMIAO, AND P. PATRICK WANG, (1999). *MT3DMS, A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and users guide, U.S. Army Engineer Research and Development Center Contract Report SERDP-99-1, Vicksburg, MS, 202 p.*

## **RINGRAZIAMENTI**

Un ringraziamento particolare va al Prof. Alessandro Gargini che ha accolto questa mia idea di tesi ed ha reso possibile lo sviluppo di questo lavoro.

Un sentito e speciale ringraziamento va alla Dott.ssa Maria Filippini la quale si è resa molto disponibile nel risolvere ogni mio dubbio e perplessità, dedicando ogni qual volta ci sia stato bisogno il suo tempo.

Ringrazio il Dott. Gabriele Cesari e tutto lo staff di Geo-Net s.r.l. per avermi fornito i dati di studio e per il supporto ricevuto in merito l'analisi dei costi.

Infine, un sentito e speciale ringraziamento va a tutta la mia famiglia ed a tutti gli amici che mi hanno supportato e sopportato in questi anni di studio.

# **APPENDICI**

## *Stratigrafie*







Riferimento: SONDAGGI AMBIENTALI EX STABILIMENTO OT-GAL	Sondaggio: S-4
Località: OZZANO EMILIA (BO)	Quota:
Impresa esecutrice: GEO-NET - Imola	Data: 04/11/2005
Coordinate:	Redattore: geol. Tiziano Righini
Perforazione: CAROTAGGIO CONTINUO SECCO	

Ø mm	R v	A r	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	
										S.P.T.	N				
						1) Dis < 0,55 0,60							0,4		Sabbia medio-fine con rari ciottoli ghiaiosi e frammenti di laterizi, sciolta, debolmente umida
				1		2) Dis < 0,95 1,00							0,7		Livello argilloso limoso, colore nocciola, poco consistente con presenza di frammenti di laterizi
				2		3) Dis < 1,95 2,00									Argilla debolmente limosa con rari livelli limoso argillosi, colore nocciola-giallastro, grado di consistenza variabile da medio ad molto elevato, presenza di calcinelli millimetrici in livelli più o meno concentrati
				3		4) Dis < 2,95 3,00									
				4									4,0		

Riferimento: SONDAGGI AMBIENTALI EX STABILIMENTO OT-GAL	Sondaggio: S-5
Località: OZZANO EMILIA (BO)	Quota:
Impresa esecutrice: GEO-NET - Imola	Data: 04/11/2005
Coordinate:	Redattore: geol. Tiziano Righini

Ø mm	R v	A r	P s	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE		
											S.P.T.	N					
															0,2	Terreno vegetale alterato con presenza di frustoli vegetali	
					1		1) Dis < 0,65 0,70										Argilla limosa, nocciola-brunastra, da mediamente consistente a consistente, umida. Presenza di calcinelli millimetrici. Da 1,5 a 3,0 il colore appare più nerastro
					2		2) Dis < 1,65 1,70										
					3		3) Dis < 2,75 2,80								3,0		Argilla, colore nocciola con lievi striature grigiastre, grado di consistenza variabile da medio ad elevato, calcinelli millimetrici concentrati in livelli, asciutta
					4		4) Dis < 3,95 4,00								4,0		

I campioni sono stati prelevati in corrispondenza dei livelli maggiormente nerastri.





















Riferimento:	Sondaggio: Pz6
Località: Stabilimento ex OT-GAL - Ozzano dell'Emilia	Quota:
Impresa esecutrice: Geo-net	Data: 8/06/07
Coordinate:	Redattore:
Perforazione: Sondaggio a carotaggio continuo	

ø mm	R v	A r	S s	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	
											S.P.T.	N				
					0.5											Ghiaia centimetrica in matrice sabbiosa (stabilizzato stradale).
					1.3											Limo argilloso grigio-verdastro scuro, con screziature, caratterizzato da elevata consistenza e plasticità ridotta: nella parte sommitale sono presenti sabbia e clasti provenieneti dallo stabilizzato sovrastante.
					8.0											Argilla limosa passante ad argilla debolmente limosa all'aumentare della profondità, di colore da bruno a bruno scuro, con screziature verdastre e grigiastre: la consistenza e la plasticità sono entrambe elevate. La colorazione si fa più scura e la frazione limosa si riduce in maniera sensibile oltre i 7 metri di profondità p.c. Sono presenti rari calcinelli di dimensioni limitate e frustroli vegetali.







