



CeSMA



SETTORE 216.02.00 - CICLO INTEGRATO DEI RIFIUTI E BONIFICHE

Accordo di collaborazione per attività di interesse comune
(ai sensi dell'ex art. 15 della Legge 241/1990)

CONVENZIONE CESMA: Prot. n PG/2025/0308308 del 19/06/2025

OGGETTO: “Studio della contaminazione da tetracloroetilene (PCE) della falda profonda dell’Area Vasta Solofrana – Montorese” - Relazione Fase A, Attività A-3 – A-4 “Analisi della circolazione delle acque sotterranee e della migrazione del tetracloroetilene (PCE) disciolto in fase acquosa nella falda profonda dell’Area Vasta Solofrana – Montorese: modello idraulico preliminare”.

Responsabile scientifico:

Prof. Dr. Ing. Andrea D’Aniello

Il Dirigente del Settore

Dott. Angelo Ferraro

I referenti della convenzione

Per Regione Campania

Dott. Geol. Vincenzo Testa

Dott. Vittorio Picariello

Per CeSMA

Prof. Chim. Marco Trifuoggi

23 ottobre 2025



Accordo di collaborazione per attività di interesse comune
(ai sensi dell'ex art. 15 della Legge 241/1990)

Accordo CeSMA – Regione Campania

**“Studio della contaminazione da tetracloroetilene (PCE)
della falda profonda dell'Area Vasta Solofrana – Montorese”**

Relazione Fase A, Attività A-3 – A-4

“Analisi della circolazione delle acque sotterranee e della migrazione del
tetracloroetilene (PCE) disciolto in fase acquosa nella falda profonda
dell'Area Vasta Solofrana – Montorese: modello idraulico preliminare”

Responsabile scientifico:

Prof. Dr. Ing. Andrea D'Aniello

Data: 23 Ottobre 2025

Indice

1. <u>Introduzione</u>	1
2. <u>Modello concettuale</u>	2
2.1. Dati disponibili e limitazioni	2
2.2. Limiti spaziali del modello, ipotesi di calcolo e scenari di simulazione	3
2.3. Condizioni al contorno, condizioni iniziali, termini sorgente e di perdita	5
2.4. Dati di ingresso del modello	7
3. <u>Modello numerico</u>	11
3.1. Campo di moto della falda profonda	11
3.2. Migrazione del PCE disciolto in fase acquosa	13
3.3. Calibrazione del campo di moto della falda profonda	14
3.4. Mesh di calcolo e ulteriori parametri del modello	15
4. <u>Analisi dei risultati del modello idraulico preliminare</u>	16
4.1. Campo di moto della falda profonda: esito della calibrazione	16
4.2. Campo di moto della falda profonda: analisi degli scenari	17
4.3. Migrazione del PCE disciolto in fase acquosa: analisi degli scenari	20
5. <u>Conclusioni</u>	35
5.1. Considerazioni e limitazioni	35
5.2. Possibili indagini integrative e sviluppi futuri	36
<u>Riferimenti bibliografici</u>	38

1. Introduzione

La presente relazione ha lo scopo di illustrare i risultati degli studi e delle analisi condotte nel corso della Fase A, Attività A-3 – A-4 (*“A-3. Creazione e sviluppo di un modello concettuale e numerico idraulico preliminare per l’analisi della circolazione delle acque sotterranee della falda profonda nell’area di studio sulla base dei dati a disposizione e dei risultati dell’attività A-1”; “A-4. Creazione e sviluppo di un modello concettuale e numerico idraulico preliminare per l’analisi della propagazione del PCE disciolto in fase acquosa nella falda profonda dell’area di studio [scenari di contaminazione ed orizzonti temporali da concordare sulla base delle informazioni storiche disponibili] sulla base dei dati a disposizione e dei risultati delle attività A-2 e A-3”* come da P.O.D.) dell’attività tecnico scientifica di *“Studio della contaminazione da tetracloroetilene (PCE) della falda profonda dell’Area Vasta Solofrana – Montorese”* nell’ambito dell’ *“Accordo di collaborazione per attività di interesse comune”* (ai sensi dell’ex art. 15 della Legge 241/1990), siglato in data 19/06/2025 (Prot. n. 308308) tra il CeSMA – Centro Servizi Metrologici e Tecnologici Avanzati dell’Università degli Studi di Napoli Federico II e la Regione Campania – Direzione Generale per la Difesa del Suolo e l'Ecosistema, avente ad oggetto l’ *“Elaborazione della modellazione idrogeologica/idraulica e di un piano di monitoraggio, propedeutici alla progettazione della successiva fase di bonifica della falda per l’Area Vasta Solofrana – Montorese”*.

A seguire, si riporta una sintesi dei diversi capitoli che costituiscono la presente relazione:

- Capitolo 2. Modello concettuale. Si fornisce una descrizione dei dati a disposizione e delle limitazioni che questi hanno imposto alla fase di creazione e sviluppo del modello idraulico preliminare della falda profonda dell’area oggetto di studio, nonché una descrizione del modello concettuale concepito e dei dati di ingresso utilizzati per la modellazione idraulica.
- Capitolo 3. Modello numerico. Si descrivono le equazioni, l’implementazione numerica e i parametri del modello numerico realizzato ed impiegato per l’analisi dei fenomeni oggetto di studio.
- Capitolo 4. Analisi dei risultati del modello idraulico preliminare. Qui si mostrano i risultati dell’applicazione del modello idraulico preliminare per l’analisi della circolazione delle acque sotterranee e della migrazione del tetracloroetilene (PCE) disciolto in fase acquosa nella falda profonda dell’Area Vasta Solofrana – Montorese.
- Capitolo 5. Conclusioni. In questo capitolo si riportano le considerazioni conclusive dell’analisi condotta con il modello idraulico preliminare, nonché i suoi limiti e i possibili sviluppi futuri qualora fossero disponibili nuovi dati ed informazioni a seguito delle indagini integrative proposte.

2. Modello concettuale

2.1. Dati disponibili e limitazioni

Nella presente sezione, si riportano i dati impiegati per l'attività di modellazione idraulica delle acque sotterranee e della migrazione del PCE nella falda profonda dell'area oggetto di studio descritta nel presente elaborato. Parte dei dati disponibili sono riportati nel documento "Relazione Fase A, Attività A-1 – A-2" (di seguito indicato come "Rel. A-1 – A-2"), frutto delle attività di raccolta dati, di modellazione geologica/idrogeologica preliminare della falda profonda e di analisi preliminare della distribuzione del PCE disciolto in fase acquosa nella falda profonda dell'area oggetto di studio (Fase A, Attività A-1 e A-2, come da P.O.D. del presente Accordo di Collaborazione Tecnico-Scientifica); pertanto, si rimanda al documento predetto per la visione e consultazione del dettaglio di questi ultimi. I dati restanti, invece, sono riportati nella loro interezza.

Ad ogni modo, si ritiene opportuno riportare a seguire quali siano i dati impiegati e le limitazioni imposte dagli stessi all'attività di modellazione idraulica:

- Stratigrafia del substrato carbonatico (Rel. A-1 – A-2); come si evince dalle elaborazioni geologiche/idrogeologiche, non è stato possibile ottenere l'andamento preciso del fondo del substrato che ospita la falda profonda dell'area oggetto di studio. Pertanto, la modellazione idraulica non potrà prevedere che un andamento orizzontale del fondo del substrato carbonatico, posto ad una profondità di – 70 m s.l.m.m., pari alla profondità massima disponibile dalle misure stratigrafiche. Ad ogni modo, con riferimento a questo valore, è stato possibile ottenere la distribuzione spaziale dello spessore del substrato carbonatico nell'area oggetto di studio e fornirlo come dato di ingresso al modello idraulico (sez. 2.4., Fig. 8).
- Piezometria della falda profonda (Rel. A-1 – A-2); come si evince dalle elaborazioni geologiche/idrogeologiche, esistono informazioni in merito alla piezometria della falda profonda dell'area oggetto di studio, però, spesso, queste sono frammentate e non direttamente fruibili. Pertanto, come mostrato nel documento Rel. A-1 – A-2, i dati piezometrici presi a riferimento sono quelli relativi alla campagna di misure di campo di maggio 2011 condotta da Paduano (2013), in quanto, tra le campagne di misura prese in esame, presenta il più alto numero di misure nello stesso periodo di riferimento ed una distribuzione spaziale tale da coprire buona parte dell'area oggetto di studio. Ad ogni modo, dato che serie storiche dei livelli piezometrici nei pozzi dell'area di studio non sono attualmente disponibili (Rel. A-1 – A-2), i dati disponibili consentono di modellare il campo di moto della falda profonda solo in condizioni stazionarie.
- Tasso di ricarica della falda profonda (Rel. A-1 – A-2); il valore fornito è un valore medio annuo con riferimento al periodo 2000-2024, pertanto, adatto ad analisi di tipo stazionario del campo di moto della falda profonda.
- Volume annuo emunto dai pozzi che attingono dalla falda profonda (Rel. A-1 – A-2); nel complesso, si hanno a disposizione informazioni solo su 7 pozzi a scopo idropotabile e 38 a scopo

industriale che attingono dalla falda profonda dell'area oggetto di studio, di cui, rispettivamente, 4 idropotabili e 37 industriali ricadono nell'area oggetto di modellazione idraulica (sez. 2.4., Fig. 3 e 4). Solo di 12 pozzi industriali si hanno a disposizione le profondità dei filtri. Pertanto, non è possibile sfruttare questi dati per una modellazione tridimensionale del campo di moto della falda profonda. Ulteriormente, non sono disponibili i tempi di esercizio dei pozzi industriali, pertanto, è possibile impiegare questi dati per modellare il campo di moto della falda profonda solo in condizioni stazionarie.

- Prove di portata in sito per la stima della conducibilità idraulica in condizioni sature del substrato carbonatico (Rel. A-1 – A-2); sono disponibili solo 6 prove di portata in sito e, pertanto, solo 6 valori della conducibilità idraulica in condizioni sature del substrato carbonatico che ospita la falda profonda oggetto di studio. Il numero risulta limitato e per un'area limitata dell'area oggetto di studio.
- Restanti proprietà del substrato carbonatico; non sono disponibili prove in sito atte a definire la porosità efficace e la dispersività per l'area oggetto di studio (Rel. A-1 – A-2). Pertanto, si è fatto riferimento a dati coerenti di letteratura. In particolare, Cherry & Freeze (1979) e Domenico & Schwartz (1997) per la porosità efficace e Schulze-Makuch (2005) per la dispersività.
- Proprietà del tetracloroetilene (PCE); proprietà quali il peso molecolare e il coefficiente di diffusione molecolare in acqua del PCE sono state desunte da letteratura. In particolare, PubChem 2.2 (2025) per il peso molecolare e CL:AIRE (2021) per il coefficiente di diffusione molecolare in acqua del PCE. Non si ravvisano particolari limitazioni o criticità legate a questa scelta in questa fase di modellazione.
- Concentrazioni di PCE nella falda profonda (Rel. A-1 – A-2); a seguito delle campagne di misura del 2014-2015 e del 2023, sono disponibili i valori di concentrazione di PCE misurati nella falda profonda in una serie di punti dell'area oggetto di studio. Non si conoscono le profondità di prelievo dei campioni utilizzati per la valutazione della concentrazione di PCE nella falda profonda. Pertanto, non è possibile sfruttare questi dati per una modellazione tridimensionale della migrazione del plume di PCE.

2.2. Limiti spaziali del modello, ipotesi di calcolo e scenari di simulazione

L'area oggetto di modellazione è di circa 21.7 km², e i limiti spaziali del modello concettuale della falda profonda (Fig. 1) sono stati definiti tenendo conto:

- dei pozzi da tutelare dalla migrazione del plume di PCE rilevato;
- della distribuzione spaziale delle misure di concentrazione di PCE;
- dei dati stratigrafici disponibili;
- dei dati piezometrici disponibili.

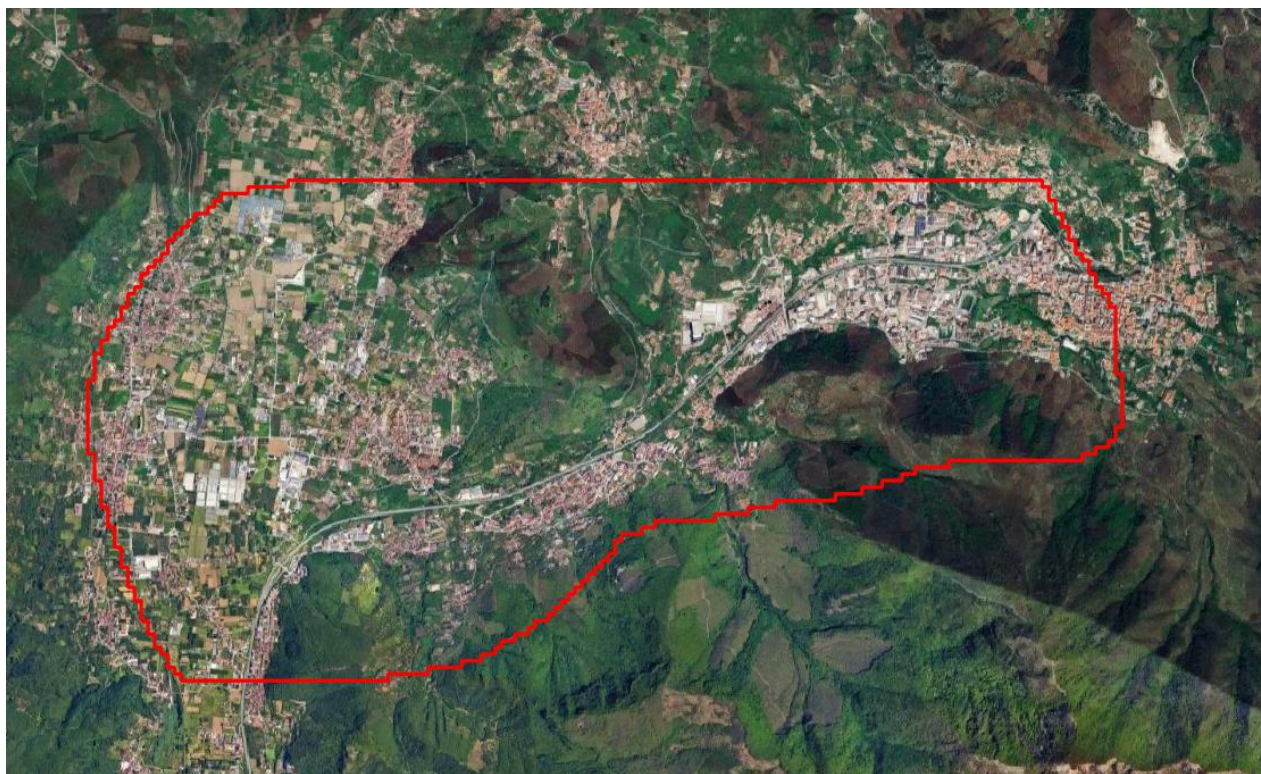


Fig. 1. Limiti spaziali dell'area oggetto di modellazione (linea rossa continua) su immagine satellitare dell'area oggetto di studio

Date le limitazioni imposte dai dati a disposizione (sez. 2.1.), sulla base degli obiettivi del presente Accordo di Collaborazione Tecnico-Scientifica, si è scelto di:

- adottare una modellazione bidimensionale, in grado, però, di tener conto sia della variabilità dello spessore del substrato carbonatico che della presenza simultanea di condizioni confinate e non confinate della falda profonda (come rilevato per l'area di studio; Rel. A-1 – A-2);
- effettuare una modellazione in moto stazionario del campo di moto della falda profonda;
- effettuare una modellazione in moto vario della migrazione del plume di PCE disciolto in fase acquosa, a partire dai dati più numerosi e temporalmente più prossimi (campagna di misure di luglio 2023; Rel. A-1 – A-2) e per un orizzonte di 20 anni, in assenza sia di interventi di bonifica che di una sorgente contaminante persistente (di cui, ad oggi, non si possiedono ancora informazioni chiare e ufficiali).

Per quanto concerne gli scenari di simulazione, per la modellazione in moto stazionario del campo di moto della falda profonda si è deciso di procedere con due scenari distinti: il primo, sfruttando direttamente le informazioni relative alla conducibilità idraulica in condizioni sature del substrato carbonatico desunte dalle prove di pompaggio (sez. 2.1.), ottenendo, così, una distribuzione spaziale della conducibilità idraulica in condizioni sature per l'area oggetto di modellazione (sez. 2.4., Fig. 9); il secondo, procedendo con una calibrazione del modello idraulico sulla base delle misure di livello piezometrico nei pozzi di misura disponibili (Fig. 5), impiegando, così, un unico valore della conducibilità idraulica in condizioni sature per tutta l'area oggetto di modellazione. Sulla base di

ciascun campo di moto, si è poi proceduto con la modellazione in moto vario della migrazione del plume di PCE, ammettendo sia la presenza del meccanismo di dispersione del contaminante che la sua assenza, per un totale di quattro scenari.

2.3. Condizioni al contorno, condizioni iniziali, termini sorgente e di perdita

Per la modellazione del campo di moto della falda profonda, sulla base dei dati disponibili (sez. 2.1.), si è proceduto considerando, come condizioni al contorno, una condizione di quota piezometrica fissa a monte e a valle dell'area oggetto di modellazione (Fig. 2), e di flusso nullo per la restante parte del contorno del dominio di calcolo. Come termine sorgente, è stato attribuito un tasso di ricarica medio (Rel. A-1 – A-2) alle quattro differenti aree di ricarica individuate (Fig. 2). Infine, come termine di perdita, è stato attribuito a ciascun pozzo (Fig. 3 e 4), a scopo idropotabile e industriale, il valore corrispettivo della portata media emunta.

Per la modellazione della migrazione del plume di PCE, sulla base dei dati disponibili (sez. 2.1.), le condizioni al contorno sono di flusso libero lungo il contorno del dominio, mentre, come condizione iniziale, la distribuzione della concentrazione di PCE dedotta dalla campagna di misure di luglio 2023 (Fig. 6 e 7). Infine, ciascun pozzo agirà come termine di perdita di soluto (flusso di massa in uscita) qualora interessato dalla migrazione del plume, sulla base della portata emunta e della concentrazione di PCE calcolata ad ogni intervallo temporale di calcolo.

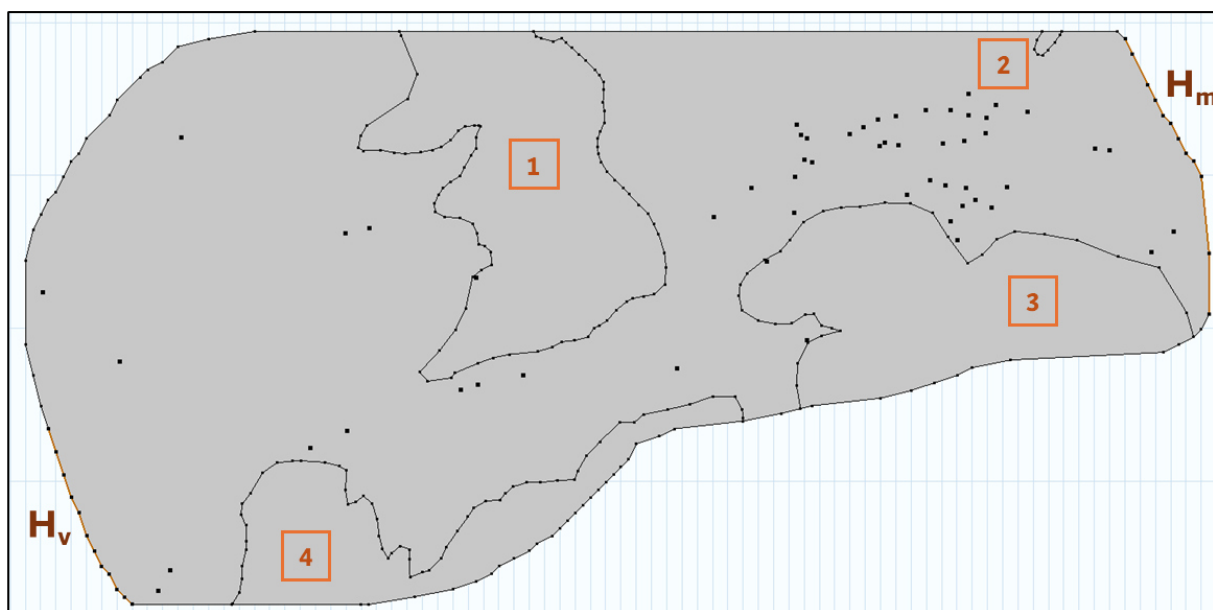


Fig. 2. Area oggetto di modellazione (in grigio) con indicazione dell'identificativo numerico delle aree di ricarica (in arancione), dei pozzi di emungimento e di misura (quadrati in nero non uniti da polilinea all'interno del dominio di calcolo) e delle condizioni al contorno di monte, H_m , e di valle, H_v (in marrone)

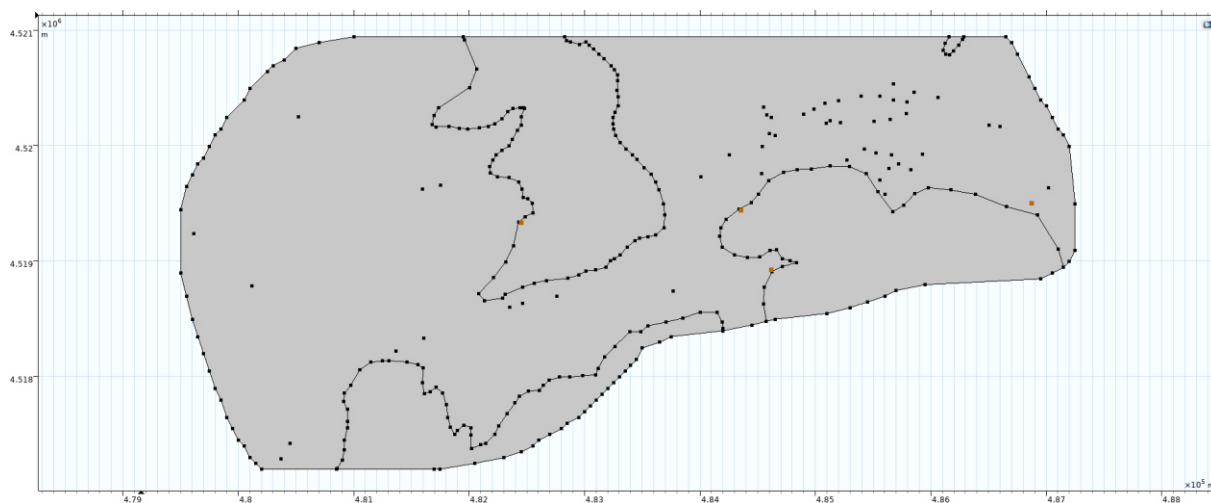


Fig. 3. Area oggetto di modellazione (in grigio) con indicazione dei pozzi di emungimento a scopo idropotabile (quadrati in marrone all'interno del dominio di calcolo)

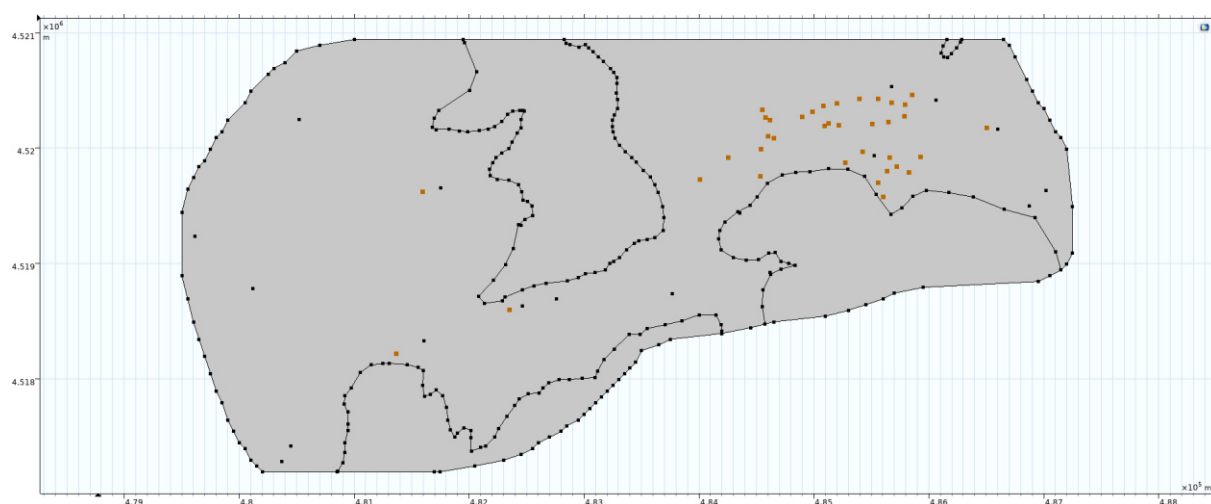


Fig. 4. Area oggetto di modellazione (in grigio) con indicazione dei pozzi di emungimento a scopo industriale (quadrati in marrone all'interno del dominio di calcolo)

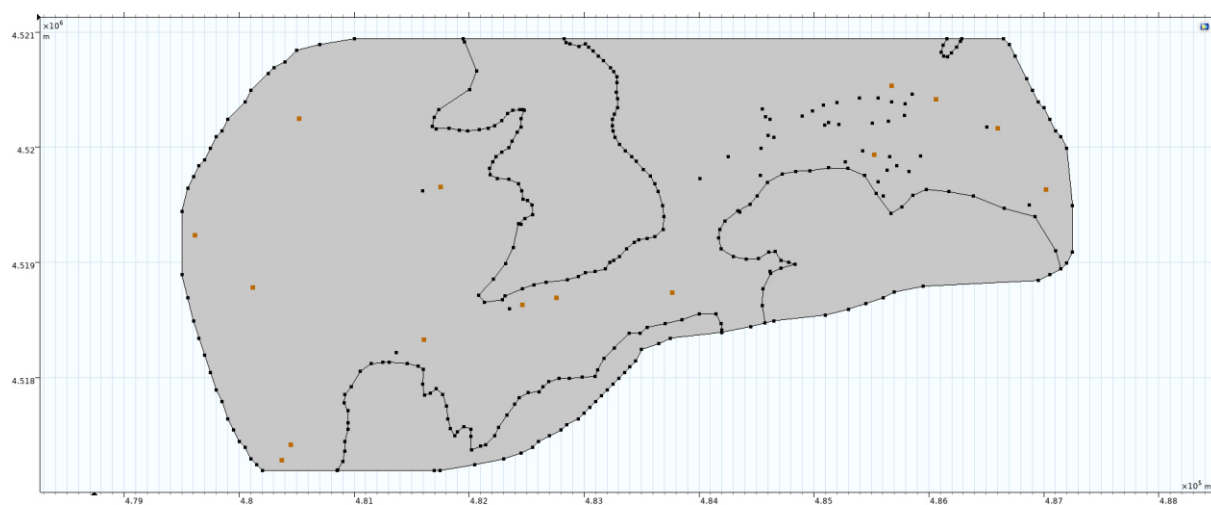


Fig. 5. Area oggetto di modellazione (in grigio) con indicazione dei pozzi di misura (quadrati in marrone all'interno del dominio di calcolo)

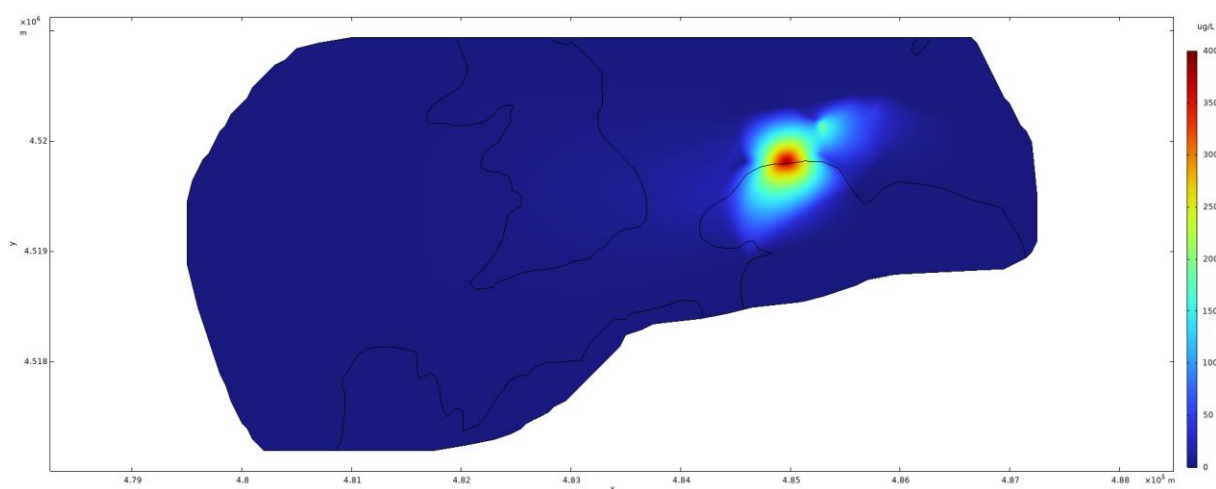


Fig. 6. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda all'istante iniziale di modellazione (luglio 2023)

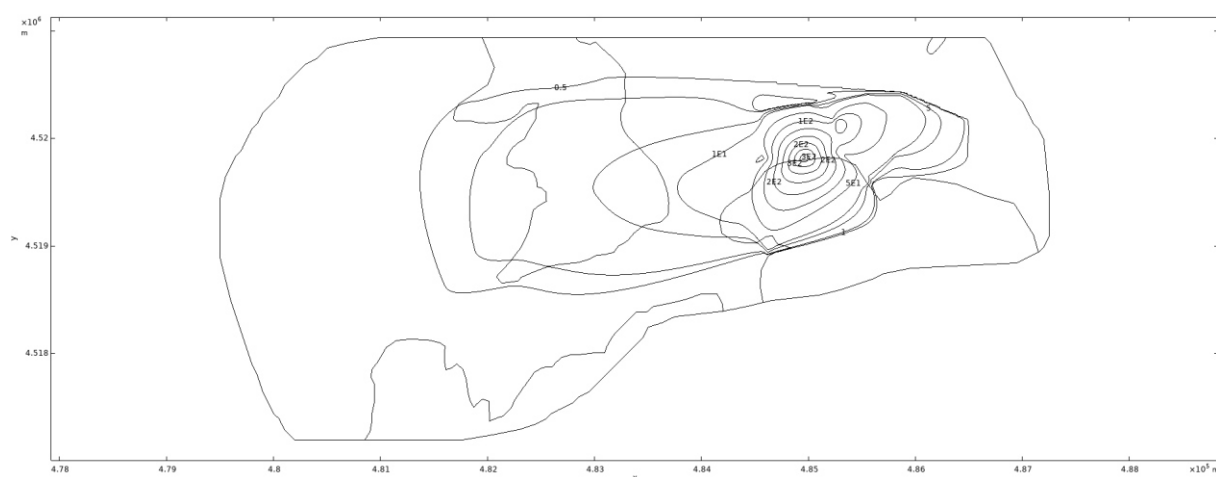


Fig. 7. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda all'istante iniziale di modellazione (luglio 2023). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$

2.4. Dati di ingresso del modello

Nelle tabelle a seguire, si riportano i valori dei dati di ingresso del modello, scelti sulla base dei dati disponibili (sez. 2.1.).

Tab. 1. Proprietà acqua e tetracloroetilene (PCE)

Densità acqua* [kg/m^3]	999.45
Viscosità dinamica acqua* [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	$1.2349 \cdot 10^{-3}$
Peso molecolare PCE [g/mol]	165.83
Diffusione molecolare PCE nella fase acquosa pura [m^2/s]	$5.61 \cdot 10^{-10}$

*a 12°C (Rel. A-1 – A-2), Engineering ToolBox (2001)

Tab. 2. Proprietà del substrato carbonatico

Porosità efficace	0.1
Dispersività longitudinale [m]	22.6
Dispersività trasversale [m]	2.26

Tab. 3. Condizioni al contorno – Campo di moto

Quota piezometrica di monte, H_m [m s.l.m.m.]	298
Quota piezometrica di valle, H_v [m s.l.m.m.]	124.1

Tab. 4. Tasso di ricarica [mm/a]

Area di ricarica 1	544.88
Area di ricarica 2	684.18
Area di ricarica 3	775.63
Area di ricarica 4	605.63

Tab. 5. Portate emunte dai pozzi a scopo idropotabile [m³/s]

D22	0.0245
D85	0.04283
D91	0.0225
D93	0.025

Tab. 6. Portate emunte dai pozzi a scopo industriale [m³/s]

I1	0.000951294
I4	0.00158549
I5	0.000554921
I6	0.000475647
I7	0.000475647
I12	0.000951294
I13	0.000951294
I15	0.000158549
I18	0.000951294
I19	0.00158549
I23	0.000634196
I24	0.000951294
I27	0.000317098
I28	0.000951294
I29	0.000951294
I30	0.012683917
I31	0.000951294
I32	0.000951294
I33	0.000951294
I34	0.000951294
I35	0.000951294
I40	0.000317098
I42	0.000951294
I45	0.000951294
I46	0.000634196
I47	0.000951294
I48	0.000634196
I49	0.000951294

I51	0.000634196
I52	0.000634196
I58	0.000951294
I67	0.001268392
I68	0.000475647
I69	0.000729325
I71	0.005073567
I72	0.005073567
I80	$3.17 \cdot 10^{-5}$
I90	0.000158549

Tab. 7. Conducibilità idraulica in condizioni sature [m/s] – Prove di pompaggio

Pozzo 1	$5.46 \cdot 10^{-6}$
Pozzo 2	$5.65 \cdot 10^{-7}$
Pozzo 3	$6.49 \cdot 10^{-5}$
Pozzo 7	$1.05 \cdot 10^{-5}$
Pozzo 8	$5.40 \cdot 10^{-7}$
Pozzo 9	$1.55 \cdot 10^{-7}$

Tab. 8. Quota piezometrica [m s.l.m.m.] – Pozzi di misura (Paduano, 2013)

Pozzo di misura 1	292.9
Pozzo di misura 2	291.8
Pozzo di misura 3	277.9
Pozzo di misura 4	259.5
Pozzo di misura 5	233.6
Pozzo di misura 6	191.2
Pozzo di misura 7	189.9
Pozzo di misura 8	185.5
Pozzo di misura 9	181.6
Pozzo di misura 11	174.6
Pozzo di misura 12	172.5
Pozzo di misura 13	153.5
Pozzo di misura 14	141.9
Pozzo di misura 15	128.7
Pozzo di misura 16	126.7

Infine, la distribuzione spaziale dello spessore del substrato carbonatico che ospita la falda profonda e la distribuzione spaziale della conducibilità idraulica in condizioni sature desunta dalle prove di pompaggio sono mostrate in Fig. 8 e 9.

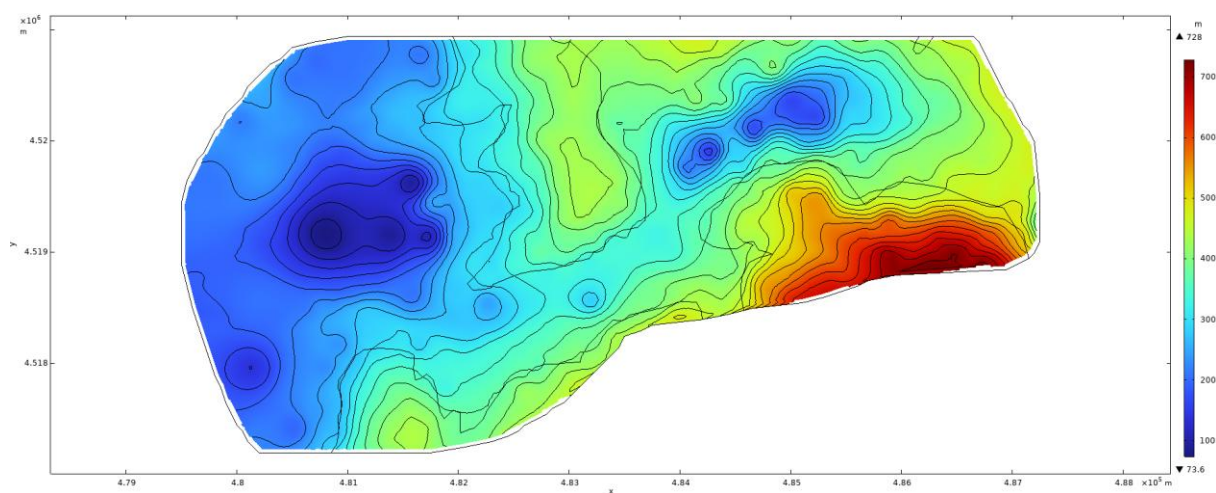


Fig. 8. Distribuzione spaziale dello spessore del substrato carbonatico (in m) che ospita la falda profonda

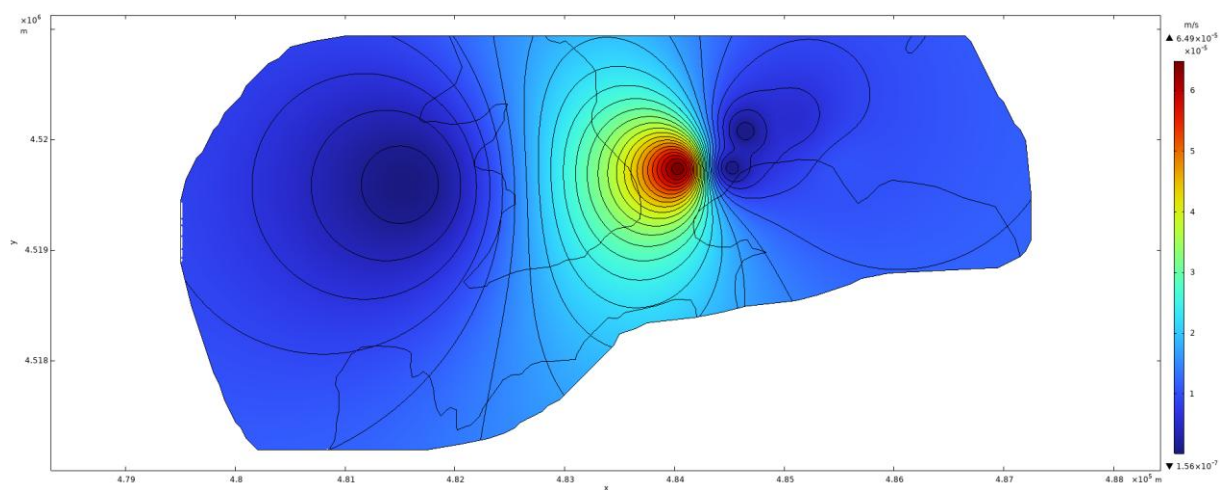


Fig. 9. Distribuzione spaziale della conducibilità idraulica in condizioni sature (in m/s) desunta dalle prove di pompaggio. Interpolazione Inverse Distance Weighting (IDW)

3. Modello numerico

3.1. Campo di moto della falda profonda

3.1.1. Equazioni

Con riferimento a un dominio bidimensionale, orientato secondo gli assi cartesiani x e y , tra di loro ortonormali, e z l'asse verticale, le equazioni che governano il fenomeno del moto delle acque sotterranee in un mezzo saturo, anisotropo, non deformabile, nel caso di fluido incomprimibile, in condizioni stazionarie sono le seguenti (Bear, 1972; Istok, 1989):

– nel caso di *falda acquifera confinata*

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x b \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y b \frac{\partial h}{\partial y} \right] = N \quad (1)$$

– nel caso di *falda acquifera non confinata*, secondo l'approssimazione di Dupuit

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x (h - z_b) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y (h - z_b) \frac{\partial h}{\partial y} \right] = N \quad (2)$$

dove h è la quota piezometrica, $b = z_t - z_b$ lo spessore della falda, z_t la quota geodetica del livello superiore dell'acquifero, z_b la quota geodetica del livello inferiore dell'acquifero, K_x, K_y la conducibilità idraulica in condizioni di mezzo saturo secondo gli assi x, y , N il termine sorgente o di perdita.

3.1.2. Implementazione numerica

COMSOL Multiphysics® (2024), software di modellazione numerica multi-fisica agli elementi finiti, è stato utilizzato per l'implementazione numerica delle Eq. 1 e 2. In particolare, dato che il modulo "Subsurface Flow" di COMSOL, generalmente deputato alla modellazione delle acque sotterranee, non consente di risolvere l'Eq. 2, e data la necessità di tener conto, simultaneamente, nell'area oggetto di studio sia di condizioni di falda acquifera confinata che non confinata, le Eq. 1 e 2 sono state riscritte ed implementate nell'interfaccia "Coefficient form PDE". In questo modo, ad ogni passo iterativo di risoluzione numerica delle equazioni, in base al valore assunto dalla quota piezometrica, è stato possibile modellare la falda acquifera in condizioni confinate ($h > z_t$) o non confinate ($h \leq z_t$). Dato che le Eq. 1 e 2 sono state riscritte in COMSOL, si è ravvisata la necessità di effettuare una verifica della correttezza dell'implementazione condotta, verificando i risultati del modello numerico operando un confronto con soluzioni analitiche proposte in letteratura (sez. 3.1.3.).

3.1.3. Confronto con soluzioni analitiche

Al fine di verificare la correttezza del modello numerico implementato, si mostrano a seguire i risultati del confronto del modello numerico con soluzioni analitiche proposte in letteratura in merito ai problemi di emungimento da falda confinata e non confinata (Bear, 1972). Nello specifico,

si considerano i casi di duplice emungimento da falda, con pozzi che penetrano tutto lo spessore dell'acquifero, assunto costante e con fondo orizzontale. Il dominio bidimensionale modellato per il confronto con le soluzioni analitiche è rettangolare (lunghezza 750 m, larghezza 900 m), con pozzi localizzati alle coordinate ($x = 375$ m, $y = 375$ m) e ($x = 375$ m, $y = 525$ m), che emungono una portata pari a $370 \text{ m}^3/\text{d}$ ciascuno. Densità e viscosità dinamica dell'acqua sono state assunte pari a 1000 kg/m^3 e $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Porosità efficace e conducibilità idraulica in condizioni di mezzo saturo sono state assunte pari a 0.35 e $4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Lo spessore dell'acquifero è assunto pari a 25 m nel caso di falda confinata e a 45 m nel caso di falda non confinata. Le condizioni al contorno del dominio sono di quota piezometrica fissata a 35 m. La mesh di calcolo consta di 17'860 elementi triangolari irregolari. In Fig. 10 e 11 si mostrano i risultati nel caso di falda confinata, mentre in Fig. 12 e 13 si mostrano i risultati nel caso di falda non confinata.

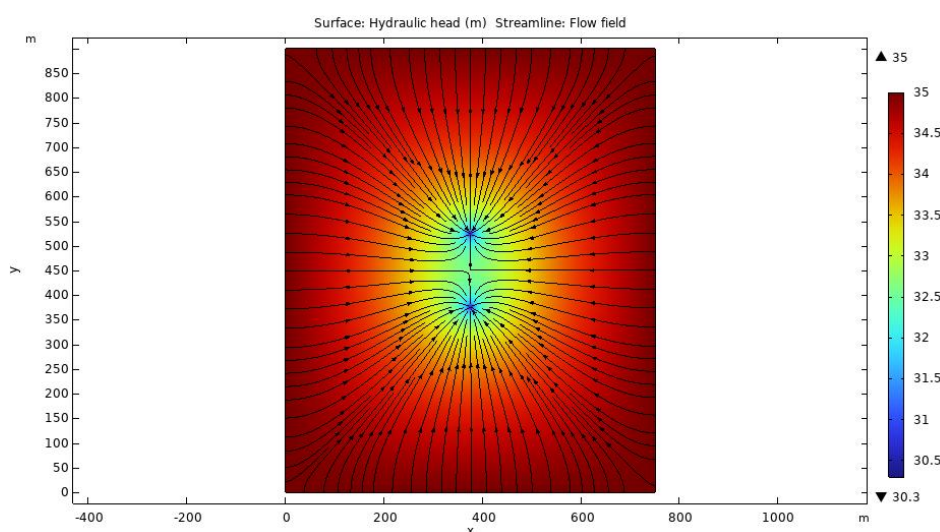


Fig. 10. Distribuzione della quota piezometrica e delle linee di flusso predette dal modello numerico – Falda confinata

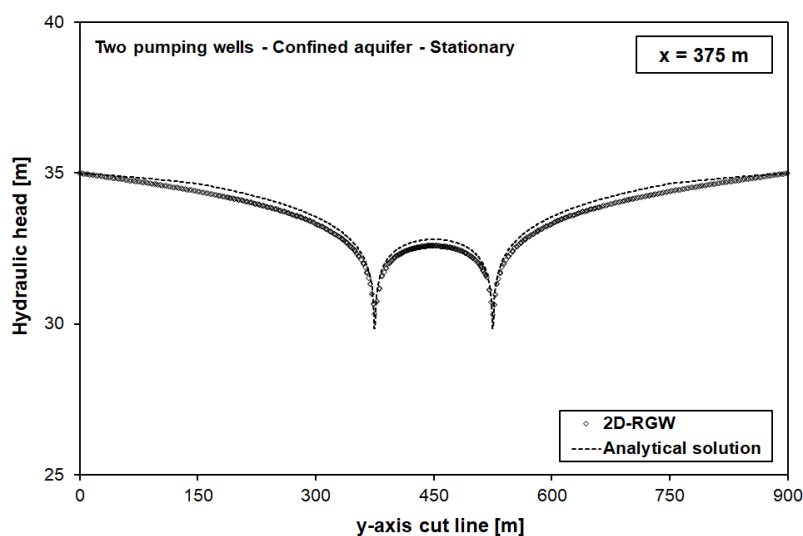


Fig. 11. Quota piezometrica predetta dal modello numerico (2D-RGW) e ottenuta tramite soluzione analitica (Analytical solution) lungo l'asse y che passa attraverso i due pozzi – Falda confinata

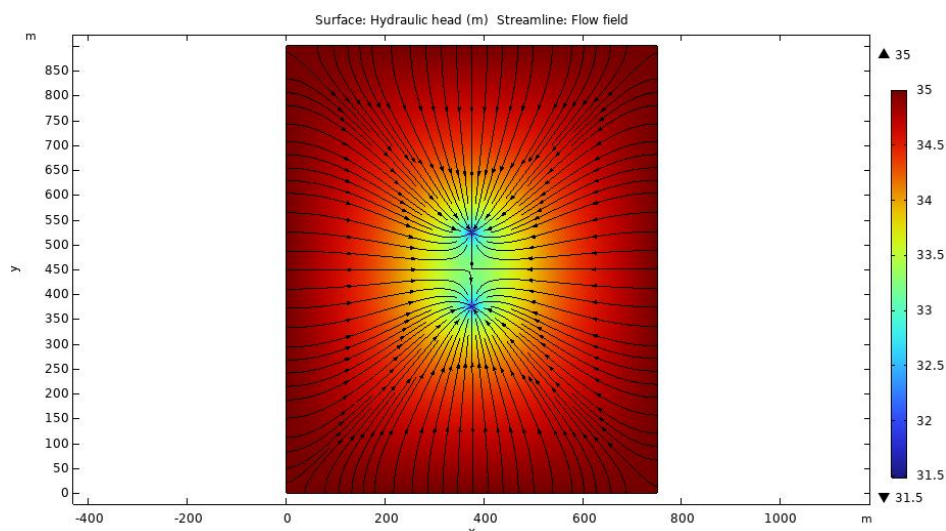


Fig. 12. Distribuzione della quota piezometrica e delle linee di flusso predette dal modello numerico – Falda non confinata

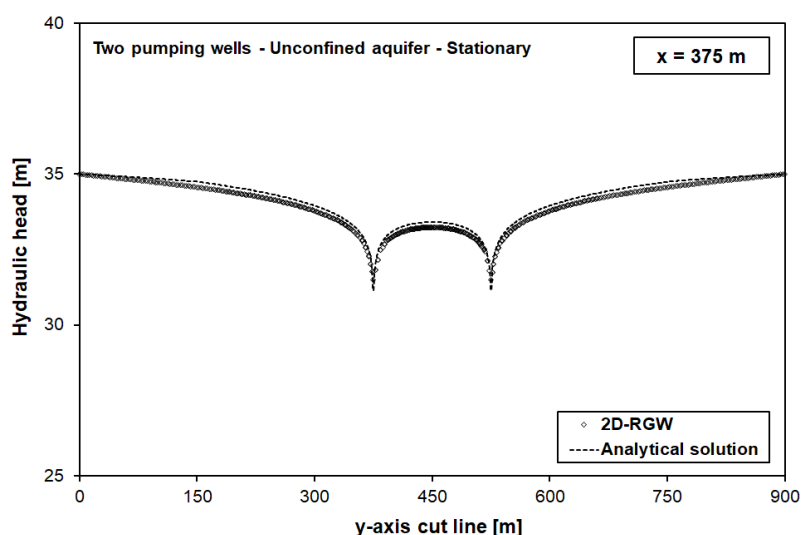


Fig.13. Quota piezometrica predetta dal modello numerico (2D-RGW) e ottenuta tramite soluzione analitica (Analytical solution) lungo l’asse y che passa attraverso i due pozzi – Falda non confinata

L’esito della verifica risulta soddisfacente in quanto le soluzioni numeriche si discostano molto poco dalle soluzioni analitiche, con differenze ben inferiori all’1%. Questo scostamento è riconducibile fondamentalmente alla dimensione della mesh di calcolo, ed un suo affinamento condurrebbe sicuramente ad ulteriori riduzioni della differenza tra soluzioni numeriche e analitiche.

3.2. Migrazione del PCE disciolto in fase acquosa

3.2.1. Equazioni

Note le caratteristiche del campo di moto della falda acquifera, la migrazione del PCE disciolto in fase acquosa in un mezzo saturo, in presenza di diffusione, advezione e dispersione è descritta dall’equazione della conservazione della massa per singolo soluto che, nella forma non conservativa, in moto vario, risulta la seguente (Bear, 1972; Istok, 1989):

$$\frac{\partial \phi c}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla c - \nabla \cdot [(D_D + D_e) \nabla c] = S \quad (3)$$

dove c è la concentrazione di PCE disciolto in fase acquosa, ϕ la porosità efficace, $\underline{u}$ è il vettore velocità apparente della fase acquosa, $D_{D,ij} = \alpha_{ijkl} \frac{u_k u_l}{|\underline{u}|}$ il tensore di dispersione, α_{ijkl} il tensore di dispersività, u_k, u_l le componenti del vettore velocità apparente, $D_e = \frac{\phi}{\tau} D^*$ il tensore di diffusione efficace, $\tau = \phi^{-5/3}$ il fattore di tortuosità secondo Millington & Quirk (1961) in condizione di mezzo saturo, D^* la diffusione molecolare nella fase acquosa pura, S il termine sorgente o di perdita.

3.2.2. Implementazione numerica

COMSOL Multiphysics® (2024), software di modellazione numerica multi-fisica agli elementi finiti, è stato utilizzato per l'implementazione numerica dell'Eq. 3. In particolare, è stata impiegata l'interfaccia "Transport of Diluted Species in Porous Media" del modulo "Subsurface Flow" di COMSOL, deputato alla modellazione delle acque sotterranee. Dato che la migrazione del PCE in forma di soluto non può influenzare in maniera apprezzabile il campo di moto della falda acquifera, il problema della migrazione del PCE è stato disaccoppiato da quello della risoluzione del campo di moto, ottenuto tramite il modello mostrato nella sez. 3.1.

3.3. Calibrazione del campo di moto della falda profonda

3.3.1. Algoritmo di ottimizzazione e sua implementazione

L'algoritmo di ottimizzazione utilizzato per la calibrazione del modello del campo di moto della falda profonda (sez. 3.1.) è l'algoritmo derivative free BOBYQA - Bound Optimization by Quadratic Approximation (Powell, 2009), incluso nel modulo "Optimization" di COMSOL Multiphysics® (2024). L'idea di base del metodo è quella di approssimare iterativamente la funzione obiettivo mediante un modello quadratico valido in una regione attorno all'iterazione corrente, la cosiddetta "trust region". Il modello quadratico viene aggiornato minimizzando la norma di Frobenius della differenza tra gli Hessiani delle due approssimazioni quadratiche consecutive.

Con riferimento ai valori misurati, lo scopo è stimare i parametri del modello in modo tale da minimizzare una funzione obiettivo, valutata ad ogni passo iterativo dell'ottimizzatore a seguito della risoluzione del problema idraulico (sez. 3.1.). Nel caso specifico, la funzione obiettivo è stata valutata con il metodo dei minimi quadrati, Eq. 4:

$$OF = \sum_{i=1}^M [P(u(\xi_i), \xi_i) - P_i]^2 / 2 \quad (4)$$

dove OF è la funzione obiettivo, P_i il valore misurato della grandezza di riferimento utilizzata per il confronto tra modello e dati di campo (nel caso in esame, la quota piezometrica misurata nei pozzi appartenenti alla campagna di misure selezionata, Tab. 8), $P(u(\xi_i), \xi_i)$ il valore della grandezza fisica corrispondente ottenuta a seguito della modellazione numerica (nel caso in esame, la quota piezometrica calcolata dal modello), che dipende dai parametri ξ_i oggetto di calibrazione (nel caso

in esame, la conducibilità idraulica in condizioni di mezzo saturo), M il numero di punti di misura e confronto.

3.4. Mesh di calcolo e ulteriori parametri del modello

La mesh di calcolo dell'area oggetto di modellazione (sez. 2.2.) consta di 163'137 elementi triangolari irregolari (Fig. 14), di dimensione massima pari a 20 m.

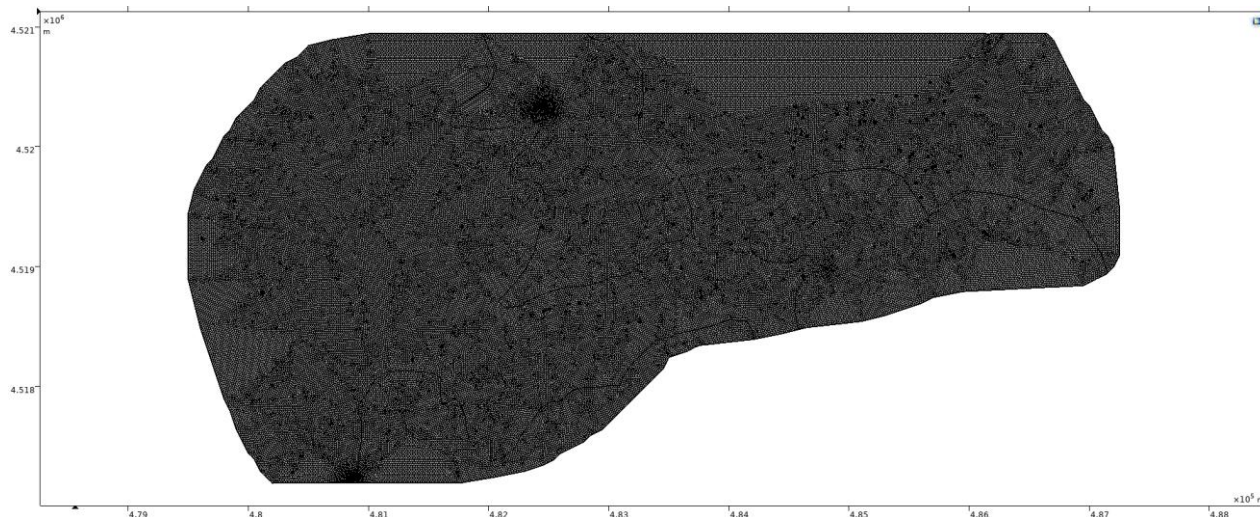


Fig. 14. Mesh di calcolo dell'area oggetto di modellazione

La convergenza dei solutori non lineari è stata assicurata da una tolleranza relativa pari a 0.001, mentre, per le simulazioni moto vario della migrazione del plume di PCE, il passo temporale è variato in base alla storia di convergenza del solutore, con un minimo pari a 1 giorno e un massimo pari a 15 giorni. Per l'algoritmo di ottimizzazione, la tolleranza di "ottimalità" è stata posta pari a 0.001, con un numero massimo di valutazioni del campo di moto pari a 1000, mentre, come limite superiore della conducibilità idraulica in condizioni sature (parametro oggetto di calibrazione) è stato scelto il valore massimo desunto dalle prove di pompaggio ($6.49 \cdot 10^{-5}$ m/s, Tab. 7), come limite inferiore il valore di $2.1 \cdot 10^{-6}$ m/s, valore al di sotto del quale il modello del campo di moto della falda profonda non ha potuto restituire risultati fisicamente consistenti assumendo una conducibilità idraulica in condizioni sature costante per tutta l'area oggetto di modellazione, e, infine, come valore iniziale, il valore medio desunto dalle prove di pompaggio ($1.37 \cdot 10^{-5}$ m/s, Tab. 7).

4. Analisi dei risultati del modello idraulico preliminare

4.1. Campo di moto della falda profonda: esito della calibrazione

L'impiego dell'algoritmo di ottimizzazione BOBYQA (sez. 3.3.), accoppiato con il modello numerico del campo di moto della falda profonda (sez. 3.1.), ha consentito di pervenire ad un unico valore della conducibilità idraulica in condizioni sature per tutta l'area oggetto di modellazione, tale da far sì che, complessivamente, ci fosse la più elevata rispondenza possibile tra quote piezometriche modellate e misurate nei 15 punti di misura disponibili dalla campagna di misure di Paduano (2013), Tab. 8. Il valore di conducibilità idraulica in condizioni sature a cui si è pervenuto è di $2.36 \cdot 10^{-6}$ m/s, che rientra nell'intervallo di valori forniti dalle prove di pompaggio in sito (Tab. 7).

In media, l'errore relativo ($|\text{valore modellato} - \text{valore misurato}|/\text{valore misurato}$), Fig. 15, si attesta intorno al 5% (1.5%, il valore minimo, e 13.3%, il valore massimo), e si ha una buona rispondenza solo in alcuni pozzi di misura. Infatti, nel corso del processo di calibrazione, la funzione obiettivo decresce rapidamente verso un valore minimo (Fig. 16), giungendo ad un plateau in prossimità della soluzione (un minimo locale). La funzione obiettivo, però, non raggiunge il valore desiderabile di 0 (corrispondenza perfetta tra valore modellato e misurato). Questo risultato, però, è consistente con la disomogeneità temporale e spaziale delle informazioni disponibili e con le limitazioni che ne derivano (sez. 2.1.). Infatti, l'esito del processo di calibrazione:

- i) mostra come sia difficile ottenere un unico valore della conducibilità idraulica in condizioni sature che possa essere rappresentativo di tutto l'acquifero profondo dell'area oggetto di modellazione, come evidenziato dalle prove di pompaggio in sito, che mostrano una variabilità della stessa fino a due ordini di grandezza (Tab. 7, Fig. 9), e dalla rispondenza dei valori modellati assumendo la conducibilità idraulica in condizioni sature desunta dalle prove di pompaggio e variabile nello spazio (Fig. 15). Infatti, in questo caso, in circa metà dei pozzi di misura, la rispondenza tra valore modellato e misurato è comparabile o persino migliore (raggiungendo un errore relativo pari allo 0.2%) rispetto a quella ottenuta a valle del processo di calibrazione, sebbene, nel complesso, l'errore relativo medio sia maggiore (9.3%), e si raggiunga un errore relativo massimo pari al 17.7 %;
- ii) evidenzia la necessità di avere più informazioni sulla distribuzione spaziale delle proprietà dell'acquifero profondo, in particolare della conducibilità idraulica in condizioni sature, tali da consentire una caratterizzazione più dettagliata dell'eterogeneità dell'acquifero e, eventualmente, analisi di tipo stocastico per la calibrazione del modello idraulico;
- iii) sottolinea la necessità di avere più informazioni, omogenee temporalmente, sulla piezometria del sito e sullo sfruttamento e la ricarica dell'acquifero profondo, così da avere condizioni iniziali, al contorno, e termini sorgente/di perdita più aderenti alla realtà fisica da modellare e caratterizzate da minori incertezze.

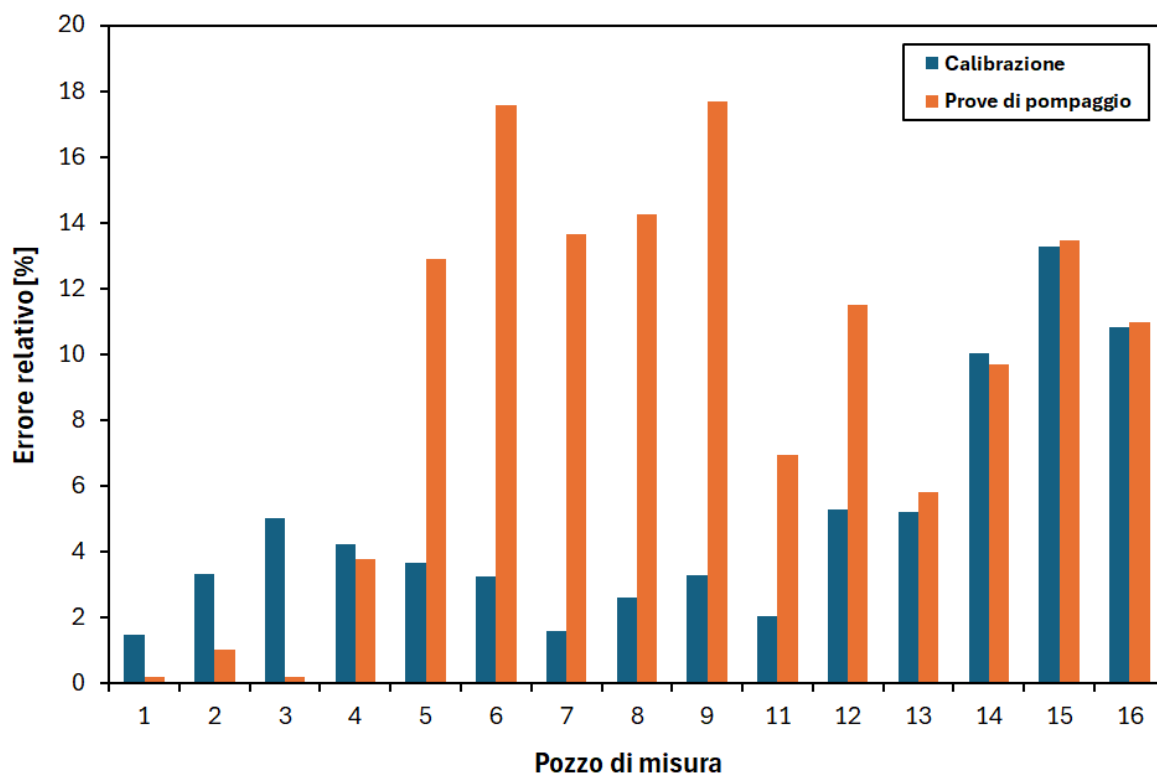


Fig. 15. Errore relativo delle quote piezometriche modellate rispetto a quelle misurate. In blu i valori ottenuti modellando il campo di moto della falda profonda utilizzando il valore calibrato della conducibilità idraulica in condizioni sature, in arancione i valori ottenuti utilizzando i valori di conducibilità idraulica in condizioni sature desunti dalle prove di pompaggio e distribuiti nello spazio

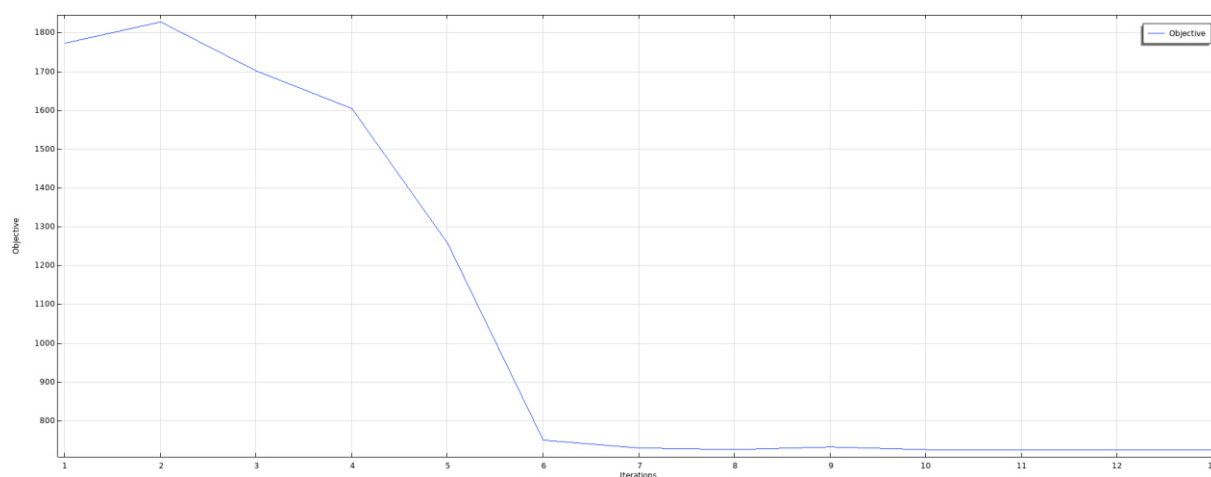


Fig. 16. Andamento della funzione obiettivo nel corso del processo di calibrazione

4.2. Campo di moto della falda profonda: analisi degli scenari

A seguire, Fig. 17-22, si mostrano i risultati della modellazione in condizioni stazionarie del campo di moto della falda profonda nei due scenari ipotizzati (sez. 2.2.).

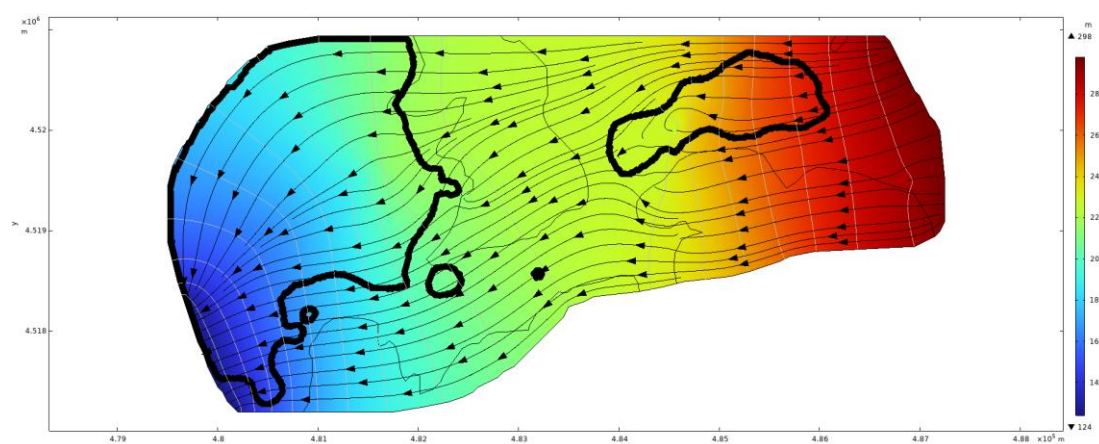


Fig. 17. Distribuzione spaziale della quota piezometrica (scala di colori), delle isopieziche (linee in grigio), delle linee di flusso (in nero, con frecce), e delle zone di acquifero confinato (in nero, spessore maggiore) predette dal modello idraulico preliminare – Scenario con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

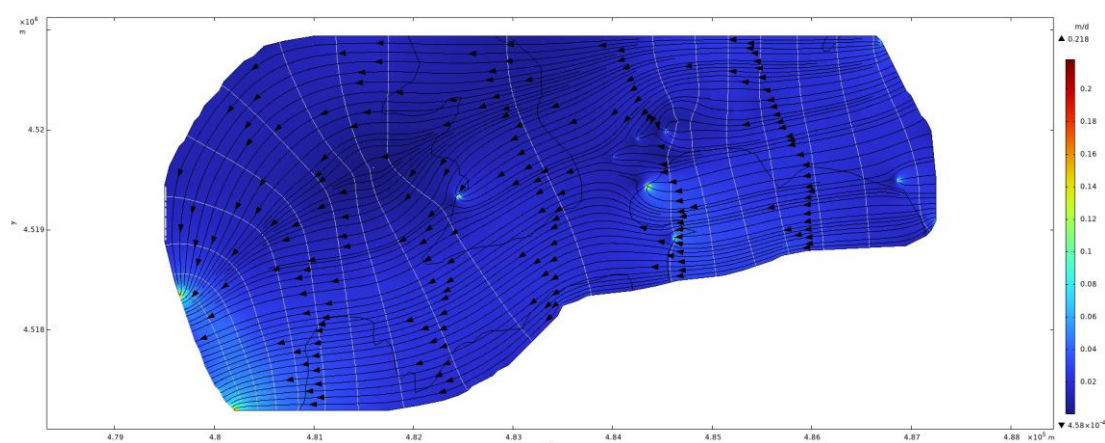


Fig. 18. Distribuzione spaziale della velocità apparente (scala di colori), delle isopieziche (linee in grigio) e delle linee di flusso (in nero, con frecce), predette dal modello idraulico preliminare – Scenario con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

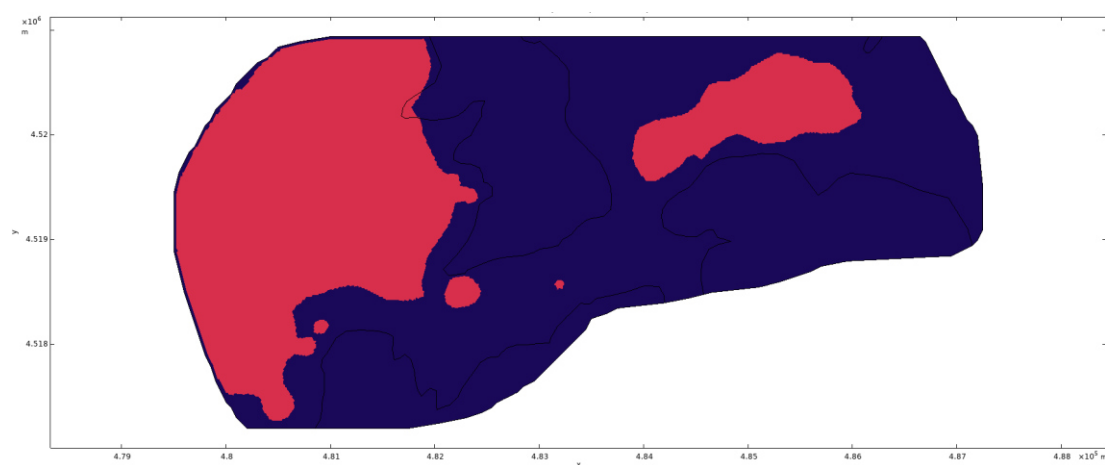


Fig. 19. Zone di acquifero confinato (in rosso) e non confinato (in blu) predette dal modello idraulico preliminare – Scenario con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

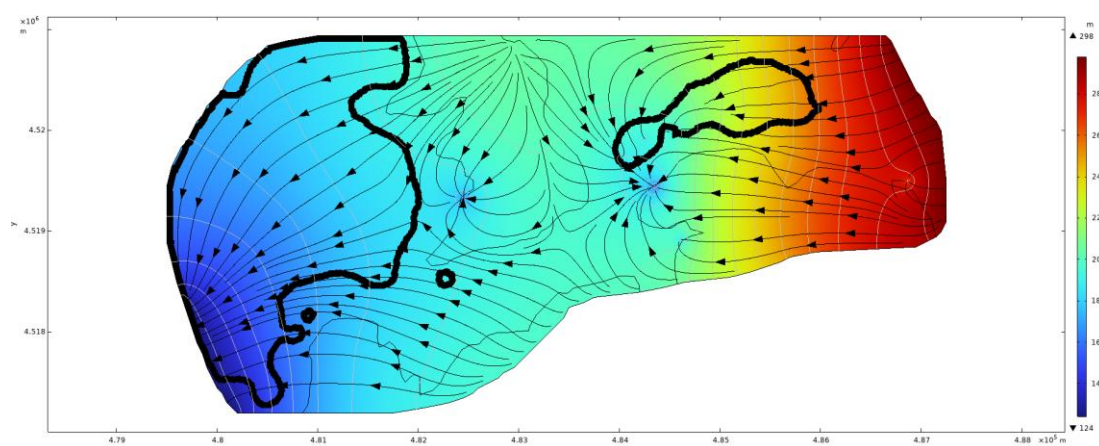


Fig. 20. Distribuzione spaziale della quota piezometrica (scala di colori), delle isopieziche (linee in grigio), delle linee di flusso (in nero, con frecce), e delle zone di acquifero confinato (in nero, spessore maggiore) predette dal modello idraulico preliminare – Scenario con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

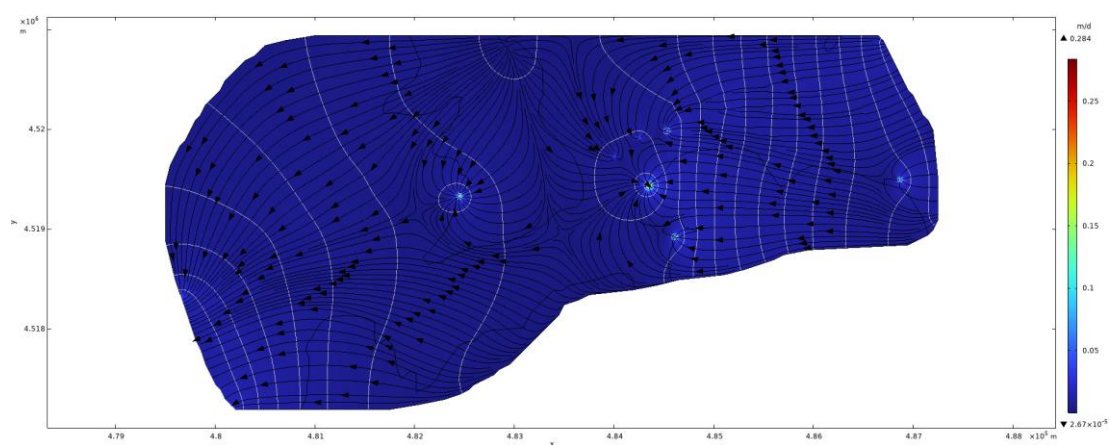


Fig. 21. Distribuzione spaziale della velocità apparente (scala di colori), delle isopieziche (linee in grigio) e delle linee di flusso (in nero, con frecce), predette dal modello idraulico preliminare – Scenario con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

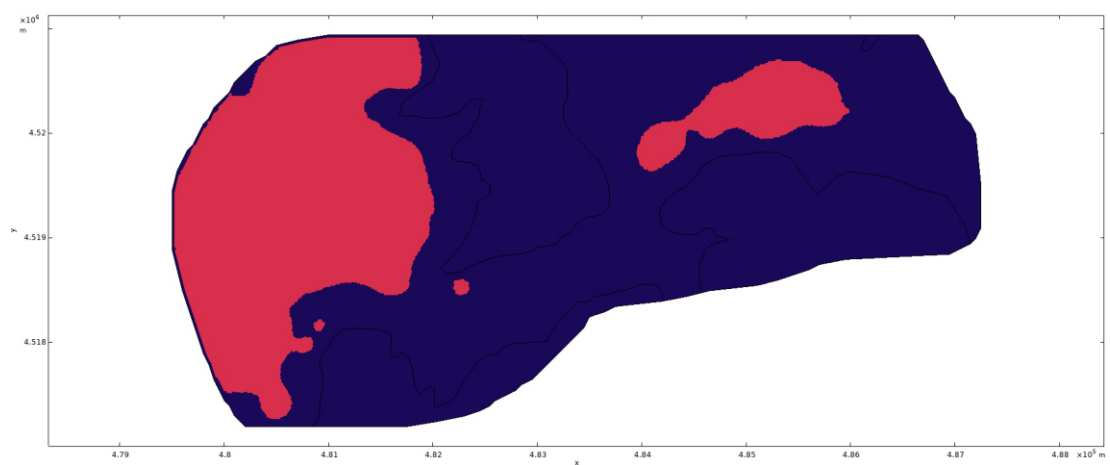


Fig. 22. Zone di acquifero confinato (in rosso) e non confinato (in blu) predette dal modello idraulico preliminare – Scenario con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

I campi di moto ottenuti con il modello idraulico preliminare nei due differenti scenari mostrano differenze rilevanti, soprattutto nella parte centrale dell'area oggetto di modellazione. Infatti, il campo di moto ottenuto impiegando il valore calibrato della conducibilità idraulica in condizioni sature mostra, in quest'area, una falda profonda che risente in maniera considerevole degli emungimenti presenti, come evidenziato dalla presenza di rilevanti coni di depressione della superficie piezometrica e dalla direzione delle linee di flusso (Fig. 20 e 21). Un effetto di richiamo della risorsa idrica profonda rilevante che, però, non si riscontra nell'analisi della piezometria condotta da Paduano (2013) o da altri autori (Rel. A-1 – A-2). Più coerente con le informazioni provenienti dalla letteratura tecnica risulta, invece, il campo di moto ottenuto impiegando la conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio (Fig. 17 e 18). Le velocità apparenti (Fig. 18 e 21) sono simili tra i due scenari, sebbene i valori massimi siano maggiori nello scenario esito della calibrazione (0.284 m/d) rispetto allo scenario che si fonda sulle informazioni provenienti dalle prove di pompaggio (0.218 m/d). Altrettanto simili tra i due scenari sono le zone in cui il modello idraulico preliminare ha restituito condizioni di acquifero confinato (falda in pressione) e di acquifero non confinato (falda libera), Fig. 19 e 22, che risultano consistenti con le analisi idrogeologiche condotte (Rel. A-1 – A-2).

4.3. Migrazione del PCE disciolto in fase acquosa: analisi degli scenari

A seguire, Fig. 23-62 (sez. 4.3.1.-4.3.4.), si mostrano i risultati della modellazione in moto vario della migrazione del plume di PCE disciolto in fase acquosa nei quattro scenari ipotizzati (sez. 2.2.).

Le differenze più marcate emergono nel confronto tra gli scenari il cui campo di moto sfrutta le informazioni provenienti dalle prove di pompaggio con quelli il cui campo di moto proviene dall'esito del processo di calibrazione. Quando disciolto in acqua, il meccanismo principale di trasporto del plume di PCE risulta quello advettivo, pertanto, tanto più sono marcate le differenze nel campo di moto della falda profonda, quanto più marcate risulteranno le differenze nella migrazione del plume di PCE. Infatti, nel caso degli scenari esito della calibrazione (sez. 4.3.3. e 4.3.4.), la presenza di rilevanti coni di depressione della superficie piezometrica nella parte centrale dell'area oggetto di modellazione fa sì che i pozzi di emungimento presenti fungano, almeno in parte, da barriera, rimuovendo, nel complesso, maggiori quantitativi di PCE (Fig. 43-50, 53-60) nonché rallentando e riducendo il plume di contaminazione. Fenomeno che non si manifesta in maniera così marcata negli scenari che si fondano sulle informazioni desunte dalle prove di pompaggio (Fig. 23-30, 33-40), sebbene ci sia una distorsione del plume di PCE e una rimozione del contaminante ad opera dei pozzi di emungimento. Infatti, in questi scenari (sez. 4.3.1. e 4.3.2.), il plume di PCE copre distanze maggiori con concentrazioni più elevate (Fig. 23-30, 33-40). A parità di campo di moto, invece, le differenze risultano meno marcate a seconda che si consideri o meno la presenza del meccanismo di dispersione del contaminante. In particolare, l'assenza del meccanismo di dispersione (sez. 4.3.2. e 4.3.4.) fa sì che il plume di PCE copra distanze leggermente superiori e con concentrazioni più elevate (Fig. 33-40, 53-60), fornendo così una previsione più cautelativa.

Questo si accompagna ad un maggiore massa di PCE rimossa dai pozzi di emungimento in assenza di dispersione (Fig. 41 e 42, 61 e 62), sebbene i picchi siano raggiunti leggermente più tardi rispetto agli scenari in cui la dispersione è presente (Fig. 31 e 32, 51 e 52). In definitiva, lo scenario più cautelativo in termini concentrazioni di PCE più elevate in falda e maggiore distanza coperta dal plume risulta essere quello in assenza del meccanismo di dispersione e con il campo di moto ottenuto sulla base della conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio (sez. 4.3.2.)

Ad ogni modo, è necessario ricordare che non si conoscono né le profondità di emungimento dei pozzi né le profondità di prelievo dei campioni utilizzati per la valutazione della concentrazione di PCE nella falda profonda (sez. 2.1.), e che il campo di moto così come i valori di concentrazione predetti dal modello idraulico preliminare sono mediati lungo la verticale (cioè, lungo la colonna satura della falda ottenuta dalla modellazione del campo di moto). Pertanto, in questa analisi, l'emungimento dai pozzi interessa tutta la colonna satura lungo la verticale e la migrazione del plume di PCE, se prossimo ad essi, risente immediatamente dell'effetto di richiamo e rimozione esito degli emungimenti presenti. Effetto che, in realtà, potrebbe non essere così marcato nell'area oggetto di studio.

4.3.1. Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

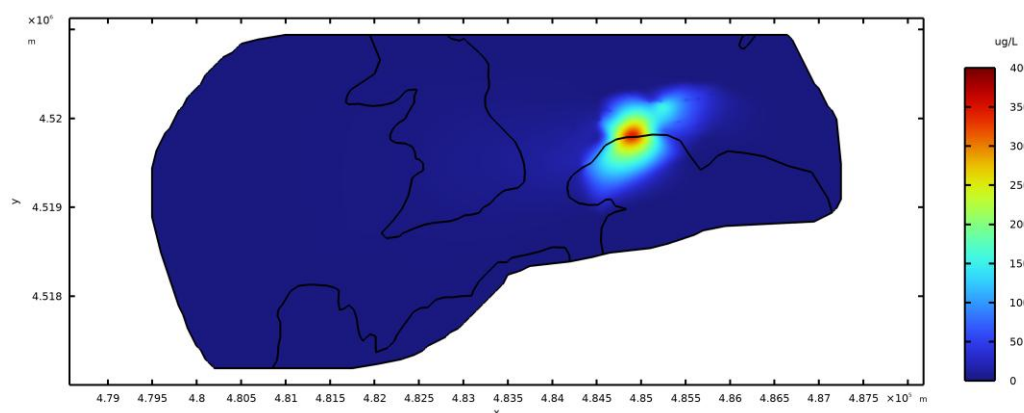


Fig. 23. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare ad 1 anno (luglio 2024) – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

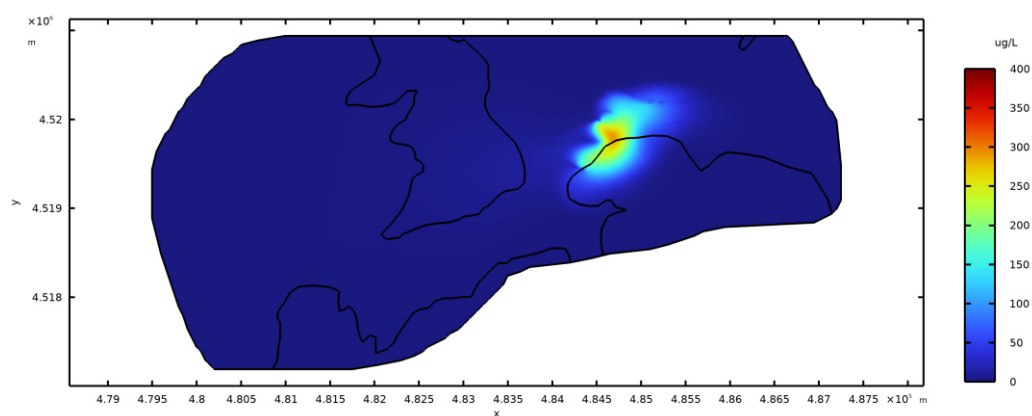


Fig. 24. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 5 anni (luglio 2028) – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

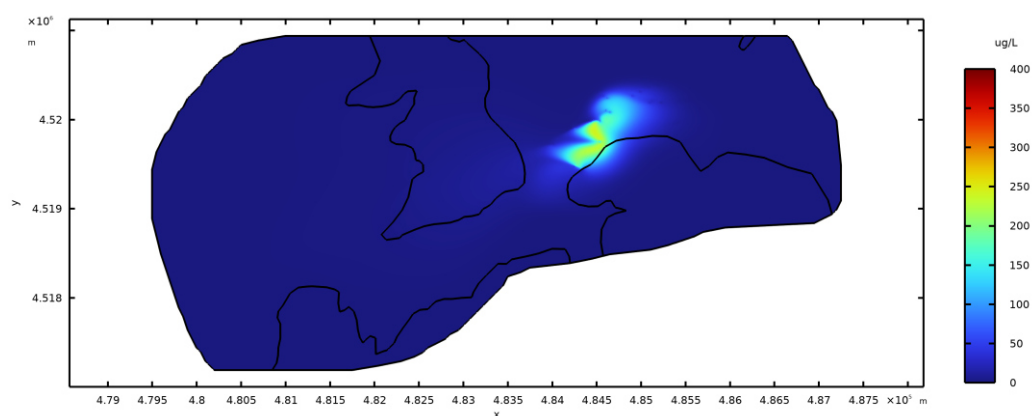


Fig. 25. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 10 anni (luglio 2033) – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

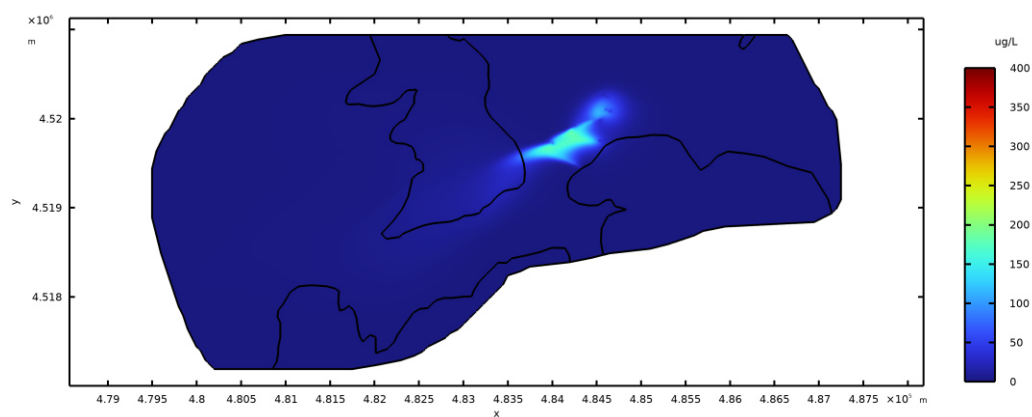


Fig. 26. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 20 anni (luglio 2043) – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

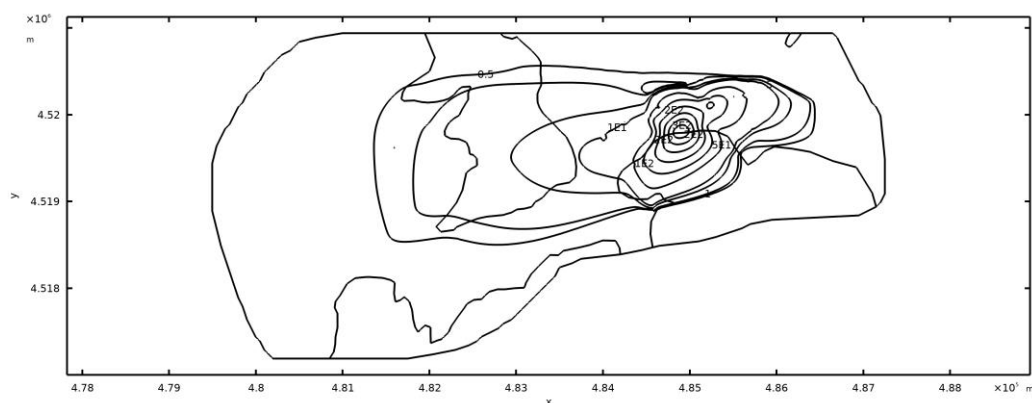


Fig. 27. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare ad 1 anno (luglio 2024). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

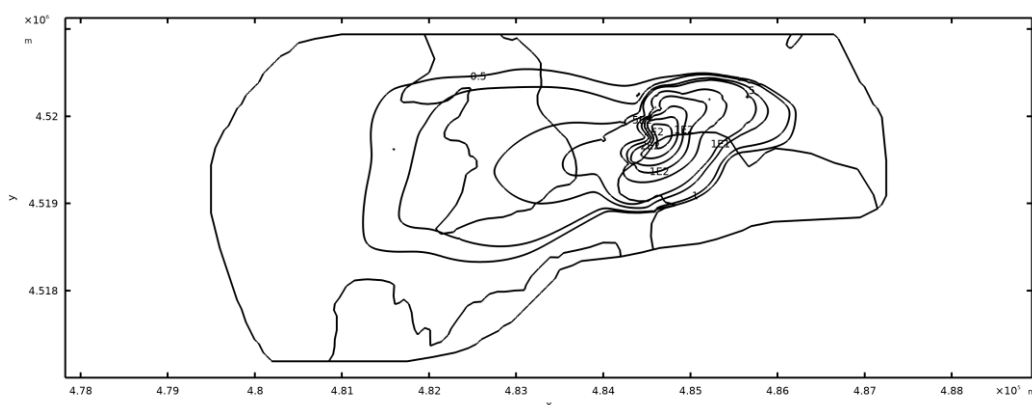


Fig. 28. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 5 anni (luglio 2028). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

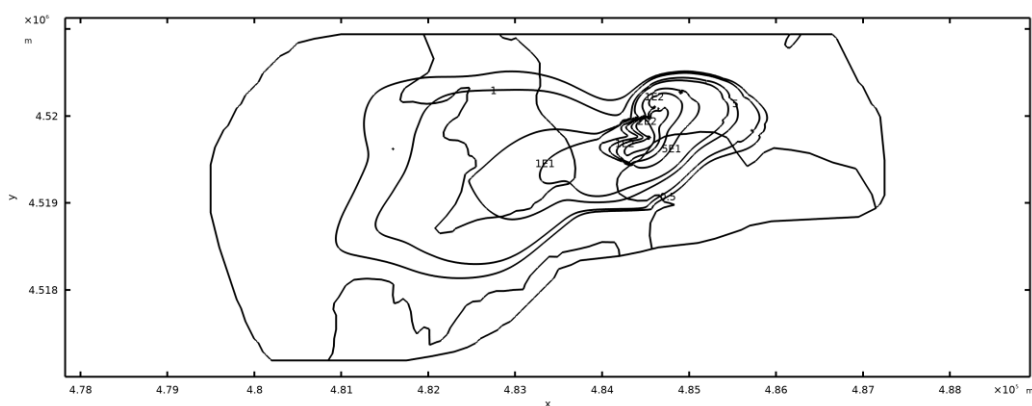


Fig. 29. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 10 anni (luglio 2033). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

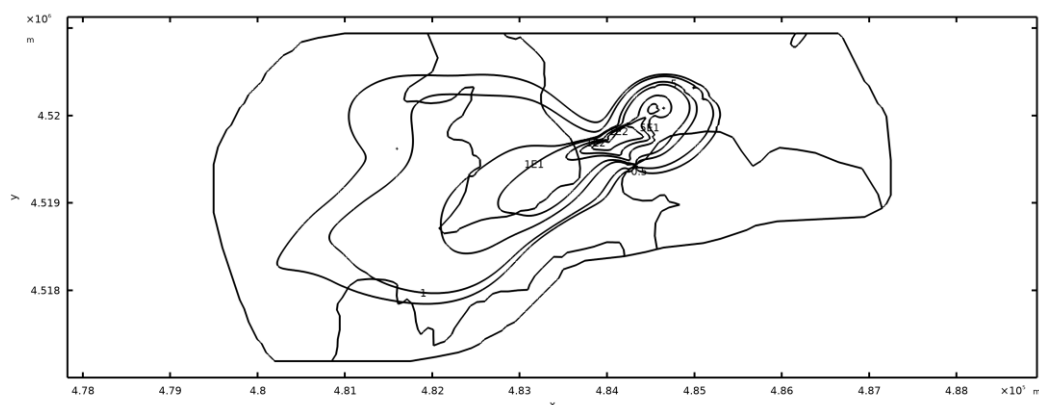


Fig. 30. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 20 anni (luglio 2043). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

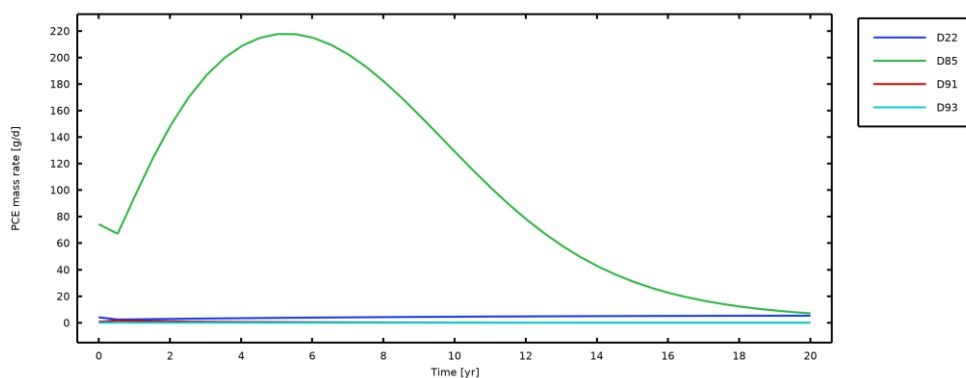


Fig. 31. Massa di PCE rimossa nel tempo dai pozzi di emungimento a scopo idropotabile predetta dal modello idraulico preliminare – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

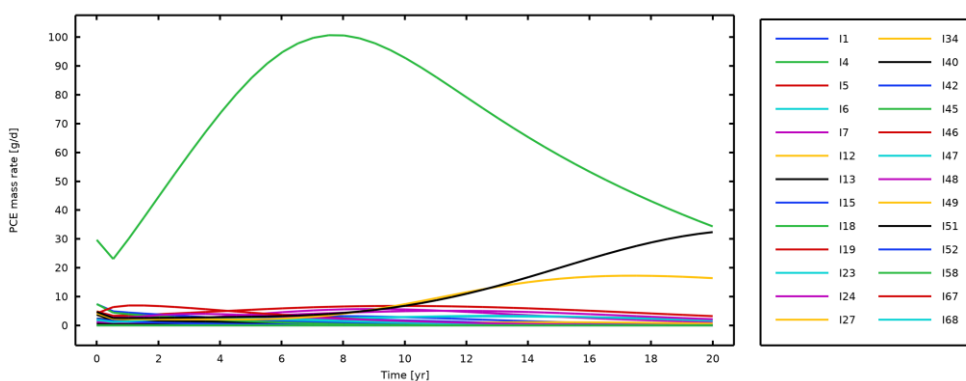


Fig. 32. Massa di PCE rimossa nel tempo dai pozzi di emungimento a scopo industriale predetta dal modello idraulico preliminare – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

4.3.2. Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

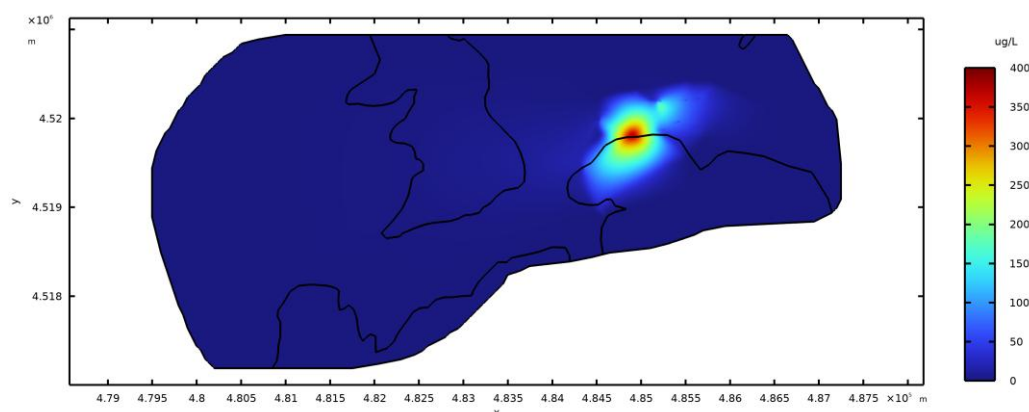


Fig. 33. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare ad 1 anno (luglio 2024) – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

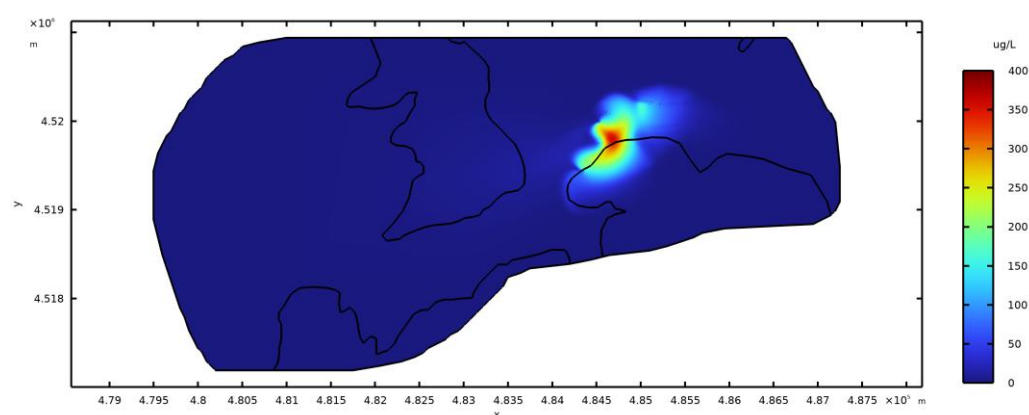


Fig. 34. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 5 anni (luglio 2028) – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

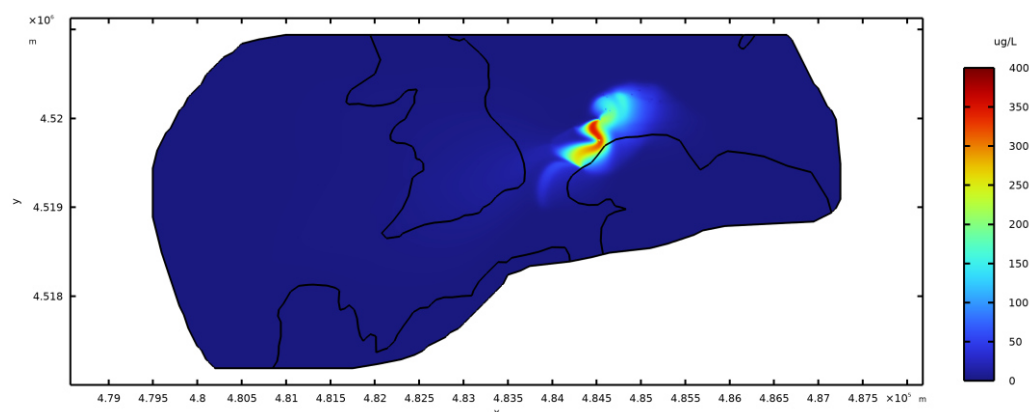


Fig. 35. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 10 anni (luglio 2033) – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

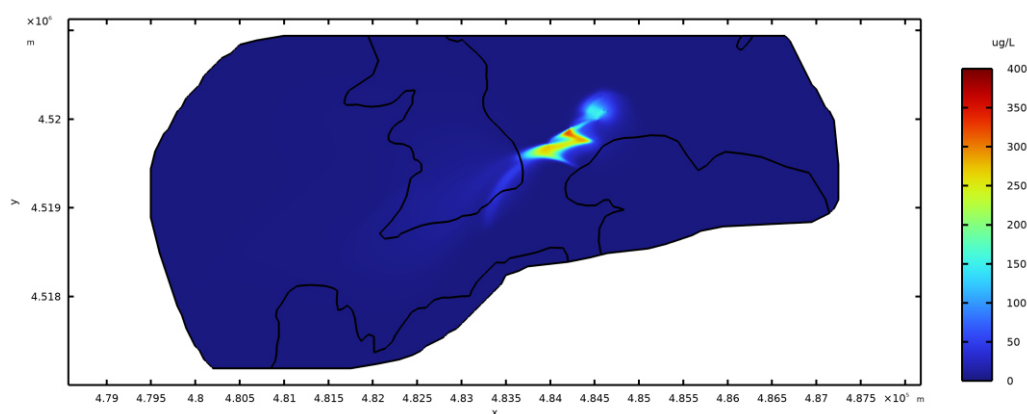


Fig. 36. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 20 anni (luglio 2043) – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

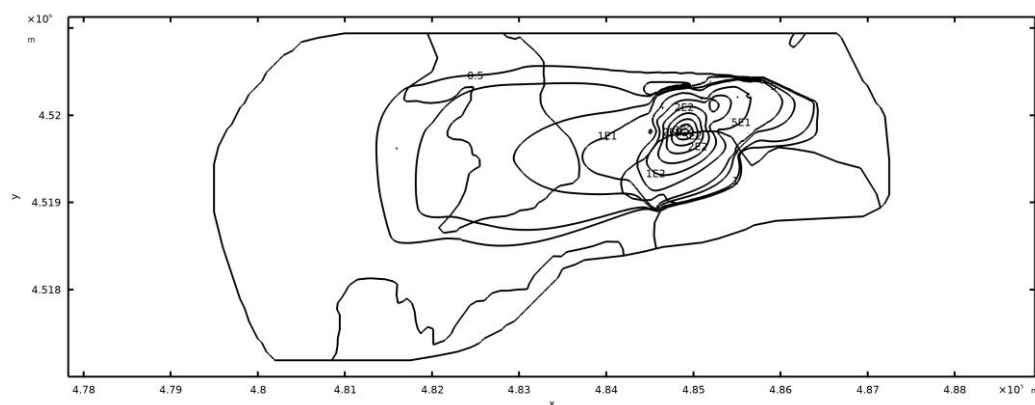


Fig. 37. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare ad 1 anno (luglio 2024). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

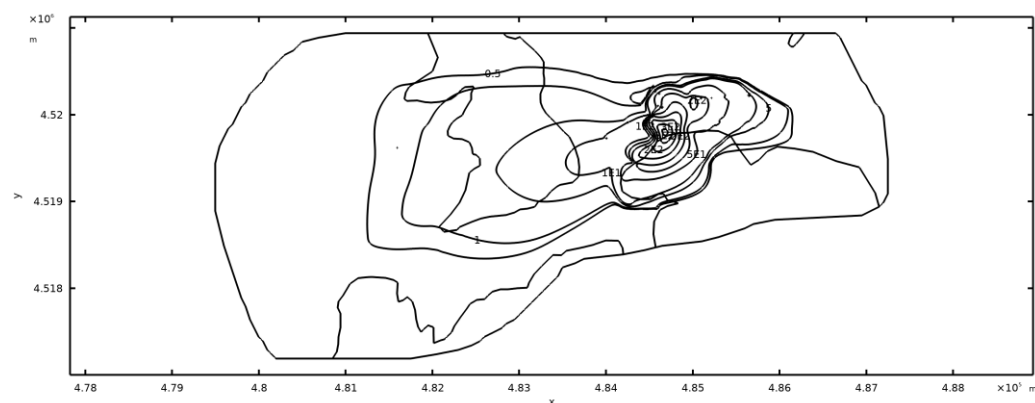


Fig. 38. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 5 anni (luglio 2028). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

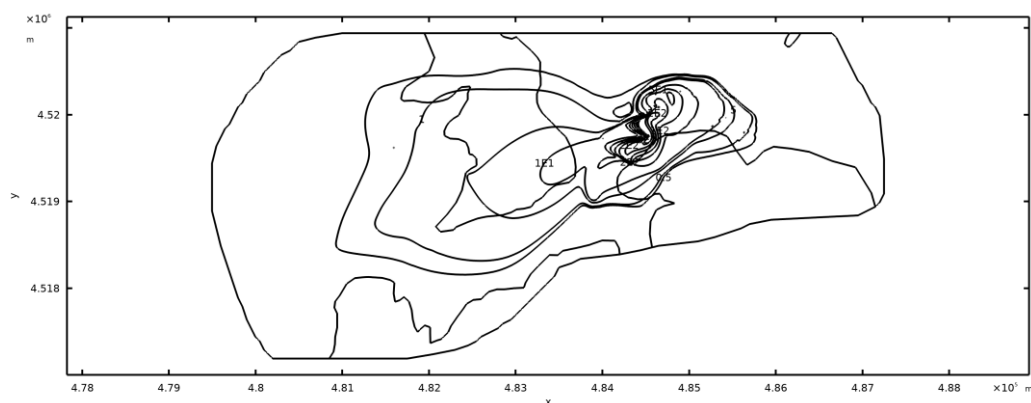


Fig. 39. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 10 anni (luglio 2033). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

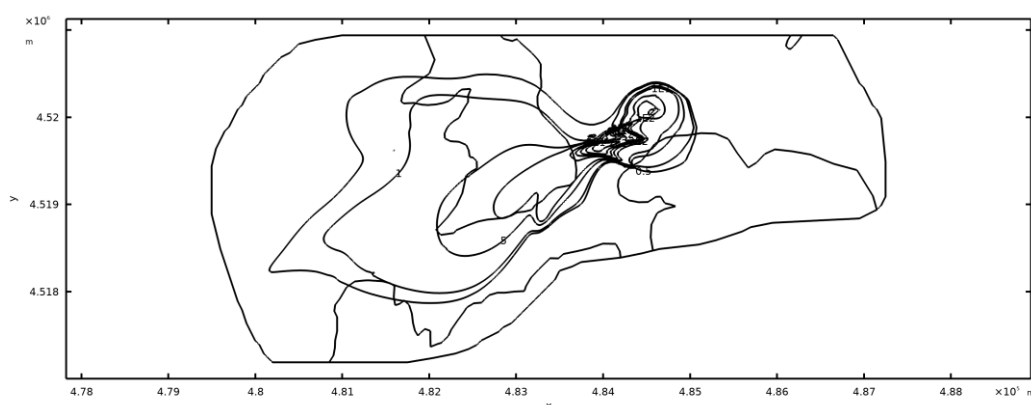


Fig. 40. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 20 anni (luglio 2043). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

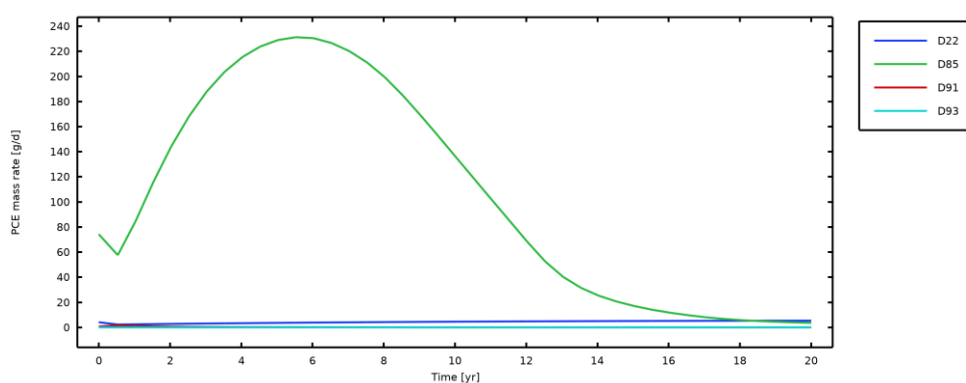


Fig. 41. Massa di PCE rimossa nel tempo dai pozzi di emungimento a scopo idropotabile predetta dal modello idraulico preliminare – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

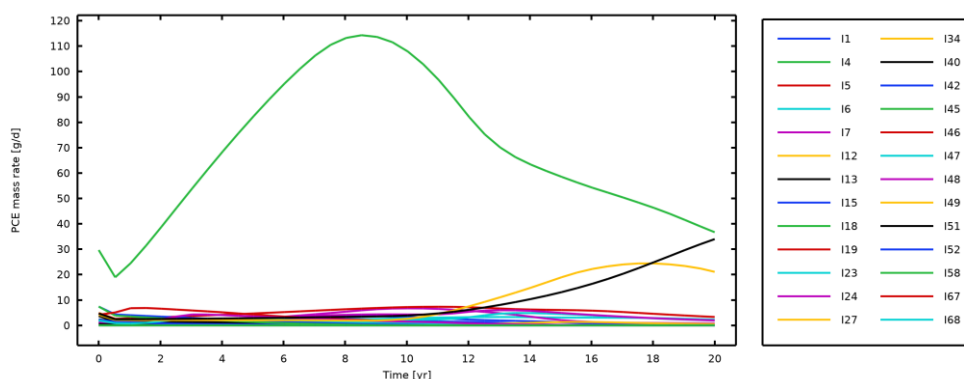


Fig. 42. Massa di PCE rimossa nel tempo dai pozzi di emungimento a scopo industriale predetta dal modello idraulico preliminare – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature distribuita nello spazio e desunta dalle prove di pompaggio

4.3.3. Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

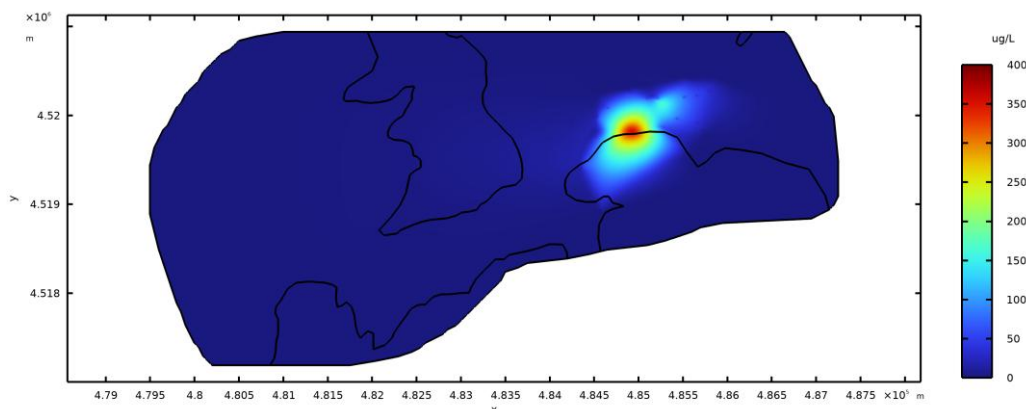


Fig. 43. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare ad 1 anno (luglio 2024) – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

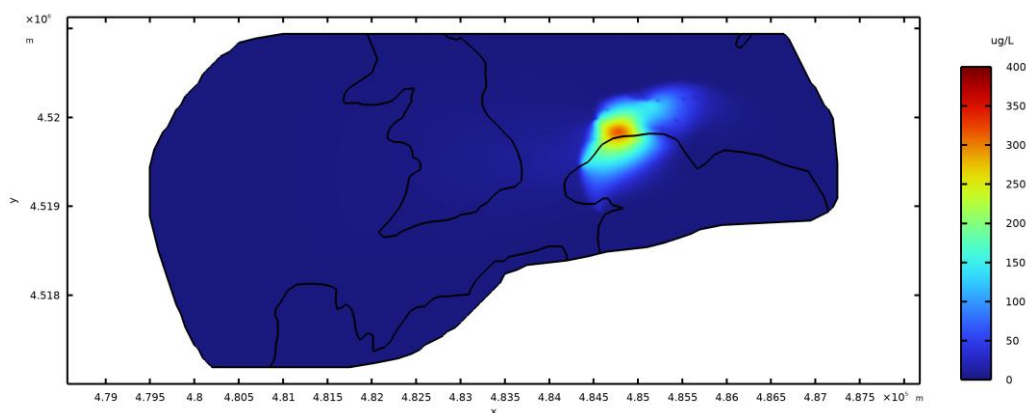


Fig. 44. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 5 anni (luglio 2028) – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

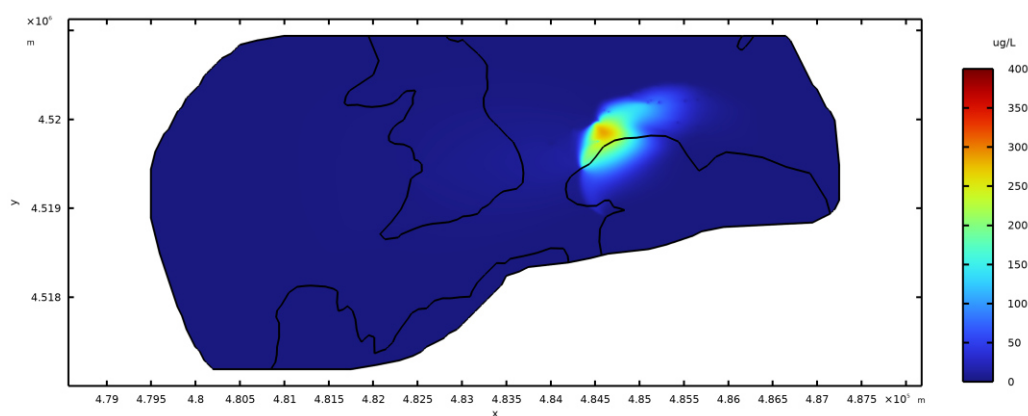


Fig. 45. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 10 anni (luglio 2033) – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

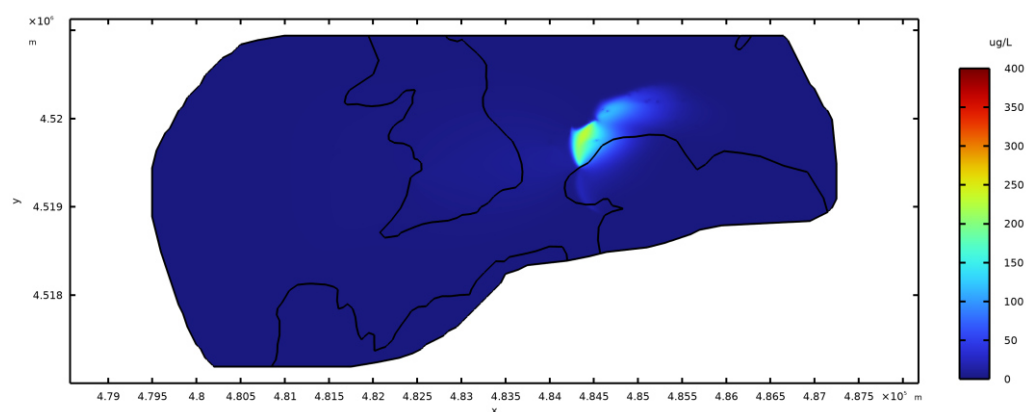


Fig. 46. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 20 anni (luglio 2043) – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

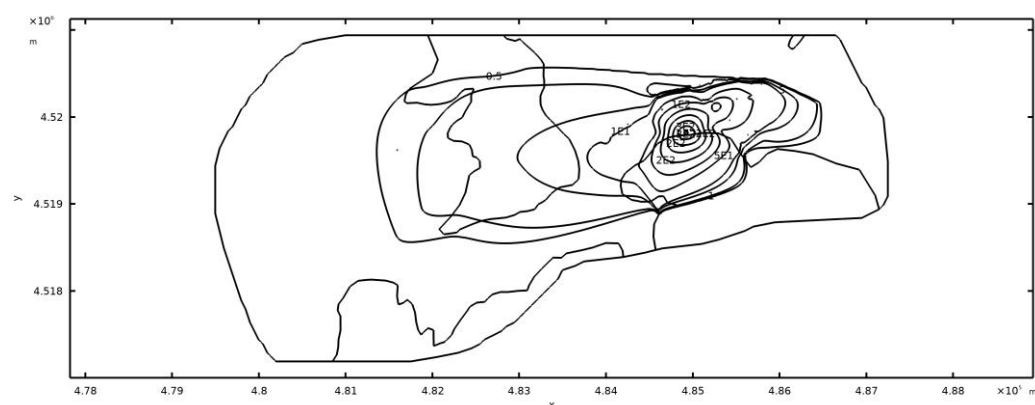


Fig. 47. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare ad 1 anno (luglio 2024). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

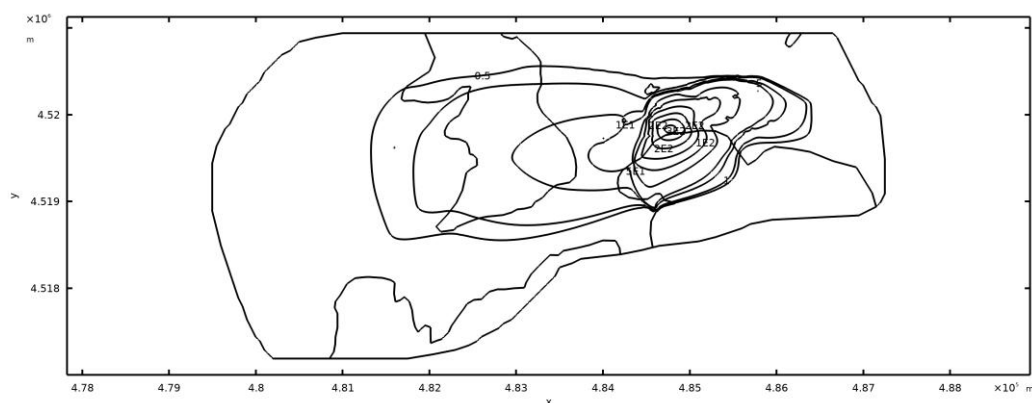


Fig. 48. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 5 anni (luglio 2028). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

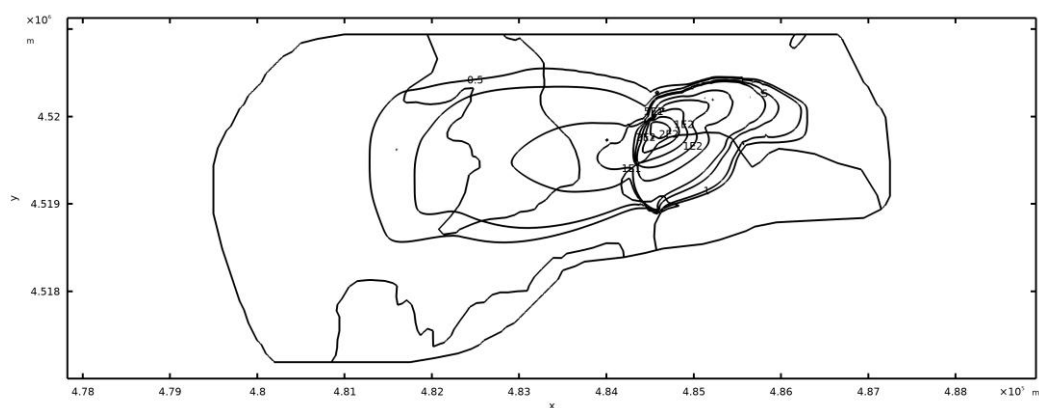


Fig. 49. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 10 anni (luglio 2033). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

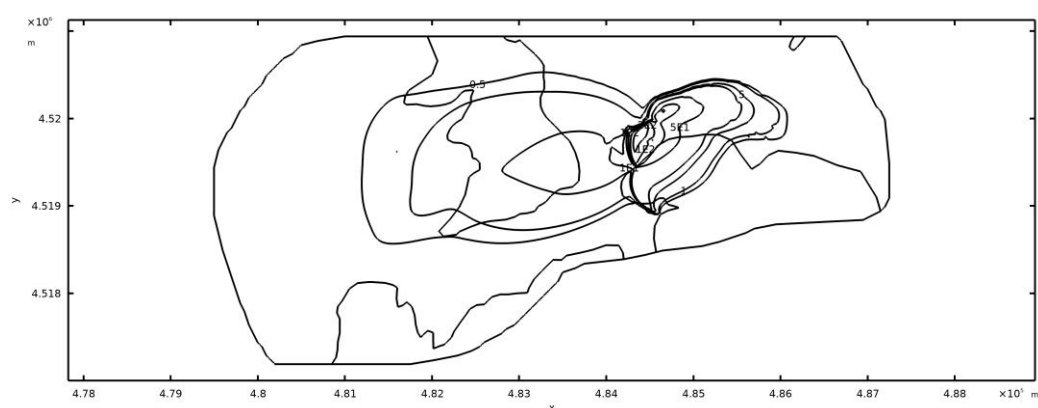


Fig. 50. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 20 anni (luglio 2043). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

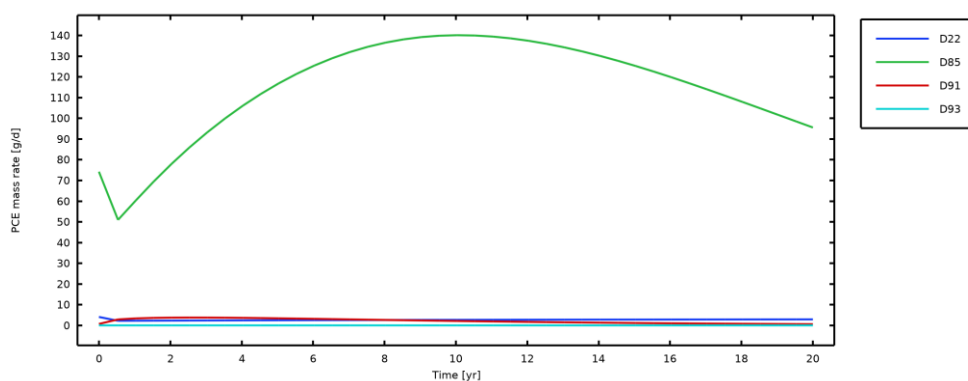


Fig. 51. Massa di PCE rimossa nel tempo dai pozzi di emungimento a scopo idropotabile predetta dal modello idraulico preliminare – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

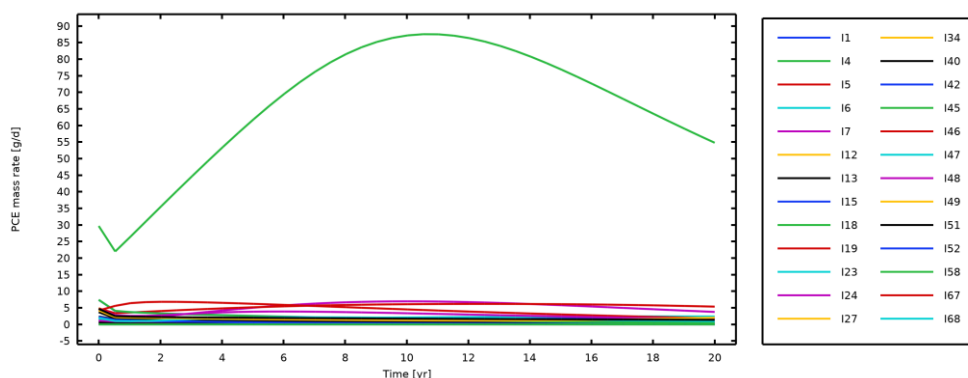


Fig. 52. Massa di PCE rimossa nel tempo dai pozzi di emungimento a scopo industriale predetta dal modello idraulico preliminare – Scenario in presenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

4.3.4. Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

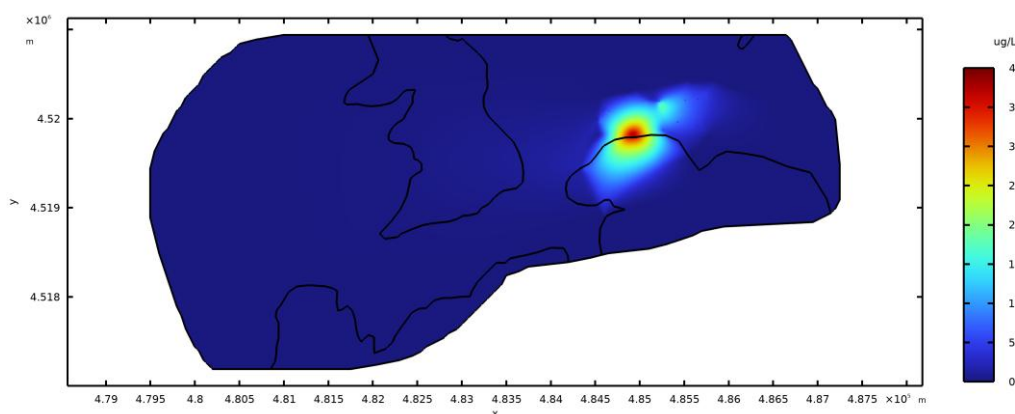


Fig. 53. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in µg/L) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare ad 1 anno (luglio 2024) – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

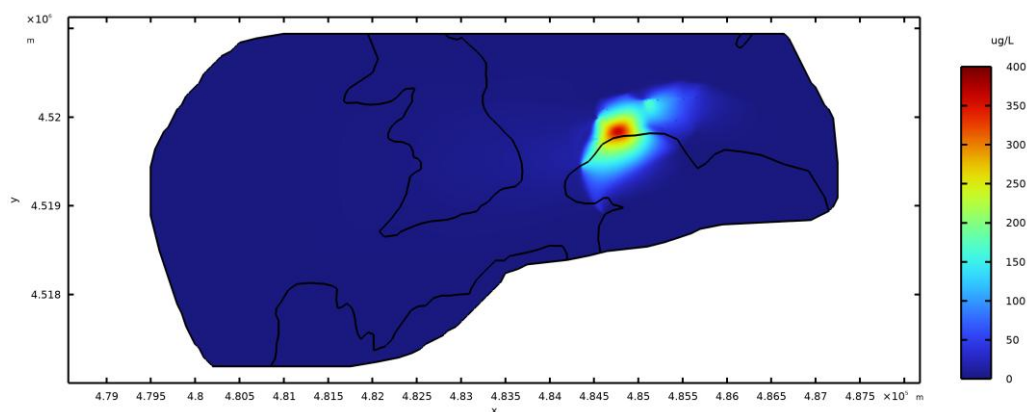


Fig. 54. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 5 anni (luglio 2028) – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

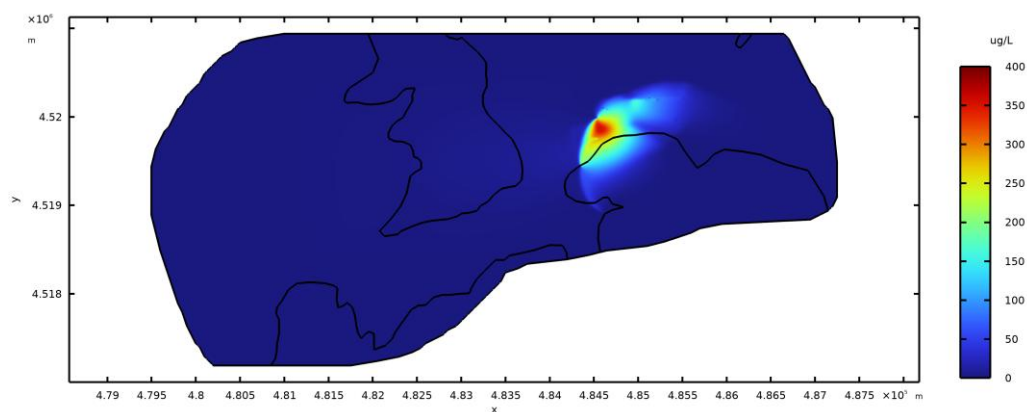


Fig. 55. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 10 anni (luglio 2033) – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

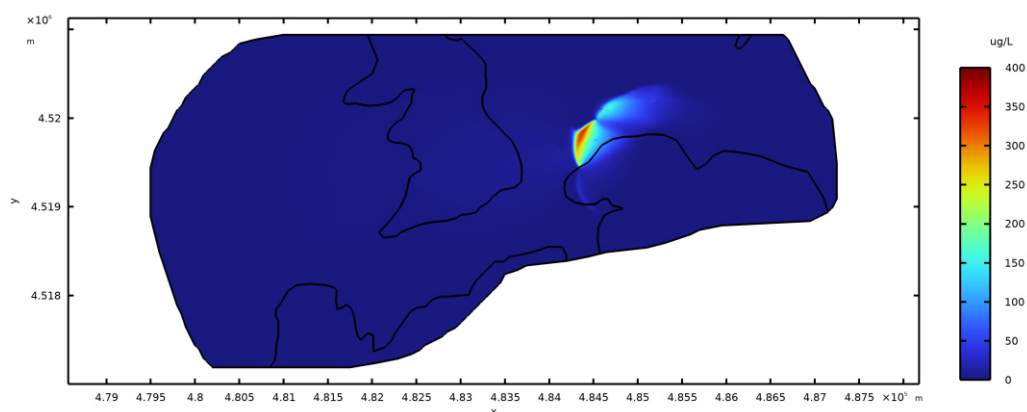


Fig. 56. Distribuzione spaziale della concentrazione di PCE (in $\mu\text{g/L}$) nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 20 anni (luglio 2043) – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

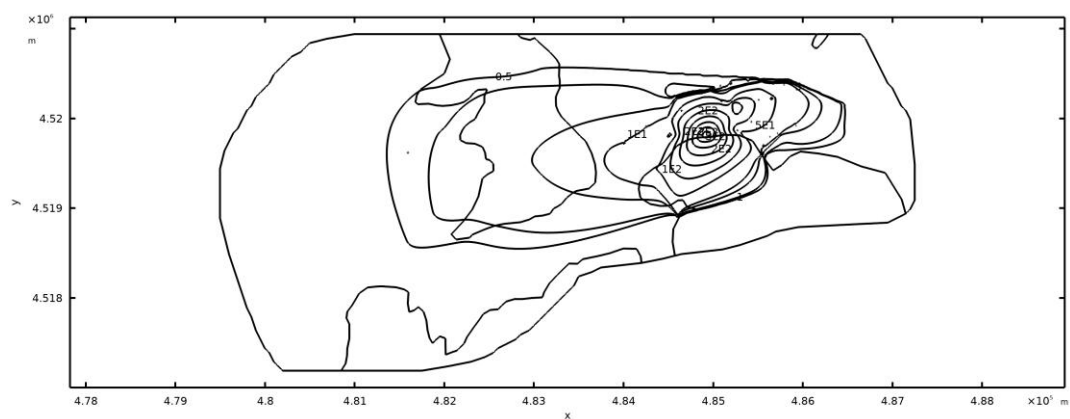


Fig. 57. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare ad 1 anno (luglio 2024). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

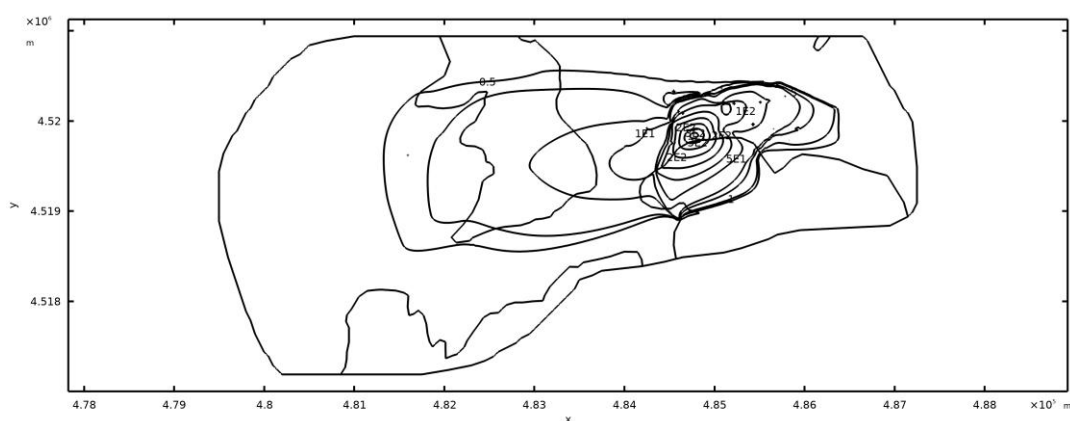


Fig. 58. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 5 anni (luglio 2028). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

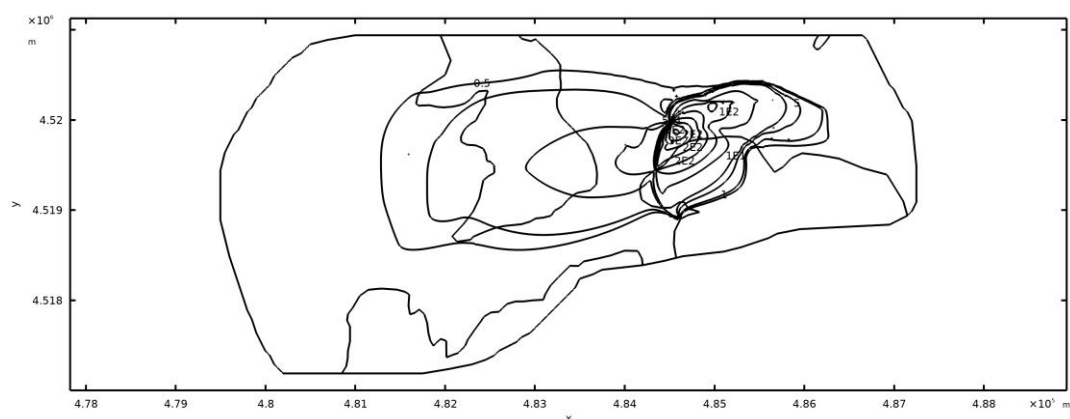


Fig. 59. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 10 anni (luglio 2033). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

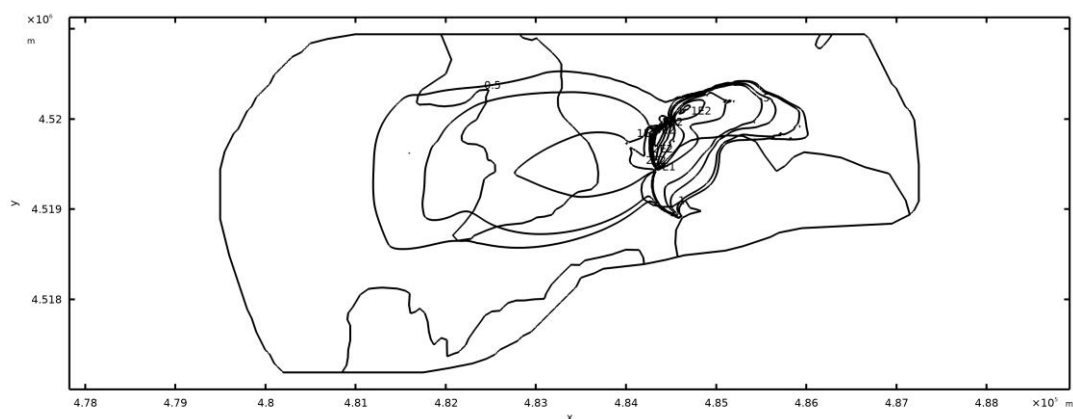


Fig. 60. Isolinee di concentrazione (in $\mu\text{g/L}$) della distribuzione spaziale di PCE nella falda profonda predetta dal modello idraulico preliminare a 20 anni (luglio 2043). Limite inferiore pari a $0.5 \mu\text{g/L}$ – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

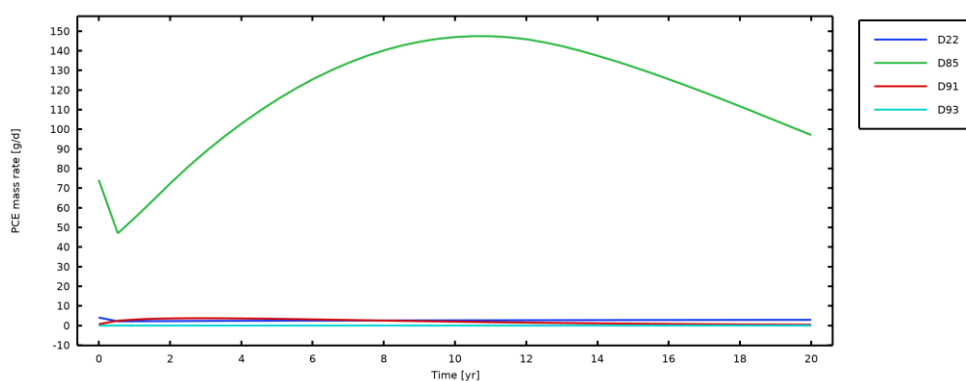


Fig. 61. Massa di PCE rimossa nel tempo dai pozzi di emungimento a scopo idropotabile predetta dal modello idraulico preliminare – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

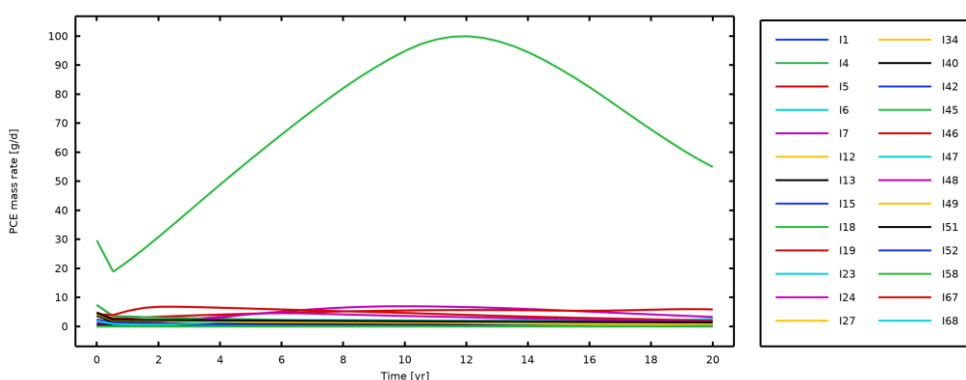


Fig. 62. Massa di PCE rimossa nel tempo dai pozzi di emungimento a scopo industriale predetta dal modello idraulico preliminare – Scenario in assenza di dispersione e con conducibilità idraulica in condizioni sature ottenuta dalla procedura di calibrazione

5. Conclusioni

5.1. Considerazioni e limitazioni

Il modello idraulico preliminare sviluppato per l'analisi della circolazione delle acque sotterranee e della migrazione del PCE disciolto in fase acquosa nella falda profonda dell'Area Vasta Solofrana – Montorese ha mostrato risultati soddisfacenti e consistenti con la fisica dei fenomeni oggetto di studio, fornendo indicazioni preliminari utili ai fini della comprensione del comportamento idraulico del corpo idrico sotterraneo in esame e della valutazione della possibile estensione e velocità di migrazione del plume di PCE presente nella falda profonda (sez. 4.). Ad ogni modo, i dati e le informazioni a disposizione hanno imposto una serie di limitazioni all'attività di modellazione idraulica (sez. 2. e 4.), suggerendo cautela nell'utilizzo dei risultati del modello idraulico preliminare qui presentato, da sfruttare, pertanto, per considerazioni prevalentemente di natura qualitativa. Per l'area oggetto di studio, le limitazioni più rilevanti imposte dai dati a disposizione sono riepilogate a seguire:

- disomogeneità temporale dei dati; ad esempio, le informazioni più recenti e meglio distribuite spazialmente in merito alla piezometria dell'area oggetto di studio risalgono alla campagna di misure del 2011 (Paduano, 2013), mentre, le informazioni più recenti in merito alle concentrazioni di PCE misurate nella falda profonda risalgono al 2023 (Rel. A-1 – A-2);
- assenza di serie storiche di livelli piezometrici, che ha imposto un'analisi di tipo stazionario del campo di moto della falda profonda. Ciò non ha consentito di valutare gli effetti della stagionalità sul campo di moto della falda profonda, sia in termini dei possibili fenomeni di ricarica/esaurimento naturale che dello sfruttamento antropico della risorsa idrica sotterranea profonda;
- assenza di informazioni in merito alle profondità di prelievo dei campioni utilizzati per la valutazione della concentrazione di PCE nella falda profonda. Pertanto, non è stato possibile caratterizzare l'estensione del plume di PCE nelle tre dimensioni né effettuare una modellazione tridimensionale della sua migrazione;
- non si conoscono le profondità dei filtri e degli impianti di sollevamento della maggior parte dei pozzi di emungimento di cui si posseggono informazioni, né i loro tempi di esercizio. Ciò ha imposto un'analisi di tipo stazionario e bidimensionale del campo di moto della falda profonda, conducendo a possibili sovrastime della massa di PCE rimossa dai pozzi di emungimento modellati, con effetti sulla modellazione dell'estensione e della velocità di migrazione del plume di PCE;
- probabilmente, le informazioni disponibili sullo sfruttamento della risorsa idrica sotterranea profonda non sono esaustive, e, quindi, è possibile che solo una parte dei pozzi di emungimento presenti nell'area oggetto di studio sia stata modellata;

- non si posseggono informazioni sufficientemente dettagliate in merito alle proprietà idrauliche del substrato carbonatico che ospita la falda profonda. Infatti, è stato possibile sfruttare le informazioni derivanti da sole 6 prove di pompaggio e solo per la conducibilità idraulica in condizioni sature;
- non si conoscono le possibili interazioni tra la falda profonda e gli eventuali corpi idrici sotterranei presenti al di sopra di essa. Aspetto che potrebbe imporre una revisione del modello concettuale (e, quindi, numerico) qui presentato;
- non si posseggono informazioni, chiare ed ufficiali, in merito alla posizione e all'entità della sorgente di contaminazione, né in merito alle modalità secondo cui il PCE ha avuto accesso alla falda profonda. Aspetto di notevole rilevanza ai fini di eventuali interventi di messa in sicurezza e bonifica della falda profonda, e che potrebbe imporre una revisione del modello concettuale (e, quindi, numerico) qui presentato.

Pertanto, ai fini di una maggiore comprensione del comportamento idraulico e dello stato di contaminazione dell'acquifero profondo dell'area oggetto di studio, fondamentale per la definizione di eventuali interventi di messa in sicurezza e bonifica, si suggerisce di condurre ulteriori indagini ed analisi integrative volte a superare le limitazioni imposte dai dati attualmente disponibili.

5.2. Possibili indagini integrative e sviluppi futuri

Si riportano a seguire una serie di possibili indagini integrative volte ad acquisire una maggiore comprensione del comportamento idraulico e dello stato di contaminazione dell'acquifero profondo dell'area oggetto di studio. Dati gli obiettivi delle Attività A-3 e A-4, oggetto della presente relazione, ci si concentrerà prevalentemente sulle informazioni da reperire ai fini di una possibile integrazione e revisione del modello idraulico preliminare qui presentato. A tal fine, si ravvisa la necessità di:

- acquisire serie storiche recenti, di durata pari ad almeno un anno e con frequenza mensile o almeno trimestrale, dei livelli piezometrici dei pozzi di misura esistenti e di eventuale futura realizzazione o integrazione, così da aggiornare le condizioni al contorno ed iniziali del modello idraulico, consentire analisi di moto vario del campo di moto della falda profonda e, quindi, una sua migliore calibrazione, nonché analisi più precise della migrazione del PCE presente in falda;
- aggiornare le informazioni in merito allo sfruttamento della falda profonda con un censimento più dettagliato dei pozzi di emungimento presenti e delle loro caratteristiche (tipologia e scopo, profondità e tipologia dei filtri e degli impianti di sollevamento, portate emunte, tempi di esercizio), così da consentire analisi tridimensionali e di moto vario del campo di moto della falda profonda, nonché analisi più precise della migrazione del PCE presente in falda;
- effettuare prove di pompaggio in tutta l'area oggetto di studio e a differenti profondità, così da ottenere una distribuzione spaziale sufficientemente dettagliata della variabilità delle proprietà del substrato carbonatico che ospita la falda profonda. Al fine di consentire analisi più dettagliate del campo di moto della falda profonda e in moto vario, le proprietà da desumere da queste prove

sono la conducibilità idraulica in condizioni sature, la trasmissività e il coefficiente di immagazzinamento;

- effettuare prove e analisi volte alla definizione delle curve di ritenzione del substrato carbonatico che ospita la falda profonda, così da consentire di modellare anche la parte non satura di questo acquifero;
- effettuare campionamenti a differenti profondità del PCE presente in falda, al fine di caratterizzare l'estensione del plume di PCE nelle tre dimensioni, così da consentire l'implementazione di una modellazione tridimensionale della sua migrazione. È opportuno che queste misure vengano effettuate nello stesso periodo di acquisizione delle informazioni piezometriche integrative, così da ottenere un'omogeneità temporale dei dati acquisiti. Analogamente, sarebbe opportuno acquisire serie storiche delle concentrazioni di PCE nei punti di misura disponibili;
- effettuare prove e analisi volte ad identificare se altri meccanismi, ad esempio, come l'adsorbimento o la degradazione biologica, possano essere rilevanti per la migrazione del PCE nella falda profonda, nonché desumere informazioni sulle dispersività in sito;
- effettuare ulteriori indagini idrogeologiche e idrauliche volte alla valutazione delle interazioni tra la falda profonda e gli eventuali corpi idrici sotterranei presenti al di sopra di essa, al fine di aggiornare il modello concettuale e numerico;
- acquisire informazioni, chiare e ufficiali, in merito alla posizione e all'entità della sorgente di contaminazione, effettuando poi indagini integrative, anche negli eventuali corpi idrici sotterranei al di sopra della falda profonda, volte alla definizione delle modalità secondo cui il PCE ha avuto accesso all'acquifero profondo, al fine di aggiornare il modello concettuale e numerico, nonché eventualmente sviluppare algoritmi di identificazione e localizzazione della sorgente di contaminazione.

L'acquisizione di nuovi dati e informazioni potrebbe permettere di aggiornare e revisionare il modello idraulico preliminare qui concepito, così da consentire la realizzazione di un modello prossimo ad un *digital twin* dell'acquifero profondo dell'area oggetto di studio, da impiegare come strumento di supporto decisionale per il monitoraggio delle condizioni dell'acquifero, per l'identificazione e la localizzazione della sorgente di contaminazione, per la definizione di interventi di bonifica e messa in sicurezza, nonché per la gestione della risorsa idrica sotterranea.

Riferimenti bibliografici

- Bear, J. (1972). Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, Inc, New York.
- Cherry, J. A., & Freeze, R. A. (1979). Groundwater (Vol. 370). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- CL:AIRE (2021). Category 4 Screening Levels: Tetrachloroethene (PCE). CL:AIRE, London. ISBN 978-1- 905046-37-9. URL: www.claire.co.uk/c4sl.
- COMSOL (2024) COMSOL Documentation – Version 6.3. COMSOL Multiphysics.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1997). Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons.
- Engineering ToolBox (2001) [online] Available at: <https://www.engineeringtoolbox.com>.
- Istok, J. D. (1989). Groundwater modeling by the finite element method (Vol. 13, p. 132). Washington, DC: American Geophysical Union.
- Millington, R. J., & Quirk, J. P. (1961). Permeability of porous solids. Transactions of the Faraday Society, 57, 1200-1207.
- Paduano, P. (2013) Groundwater planning and protection: assessment of environmental indexes in complex aquifer systems. the Solofrana river valley case study (South Italy). PhD Thesis, University of Naples Federico II. URL: <http://www.fedoa.unina.it/id/eprint/9502>.
- Powell, M. J. (2009). The BOBYQA algorithm for bound constrained optimization without derivatives. Cambridge NA Report NA2009/06, University of Cambridge, Cambridge, 26, 26-46.
- PubChem 2.2 (2025). Tetrachloroethylene, compound summary. NIH – National Library of Medicine. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/31373>.
- Schulze-Makuch, D. (2005). Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. Groundwater, 43(3), 443-456.