

VERIFICA E OTTIMIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI CONTENIMENTO IDRAULICO COMPLESSO (INIEZIONE PIÙ ESTRAZIONE) IN UN ACQUIFERO CARBONATICO

Elena Leale, Fabio Canova

Ragione Sociale **URS** Italia S.p.A.

AECOM

Torino, 14-15 Ottobre 2015



Sommario

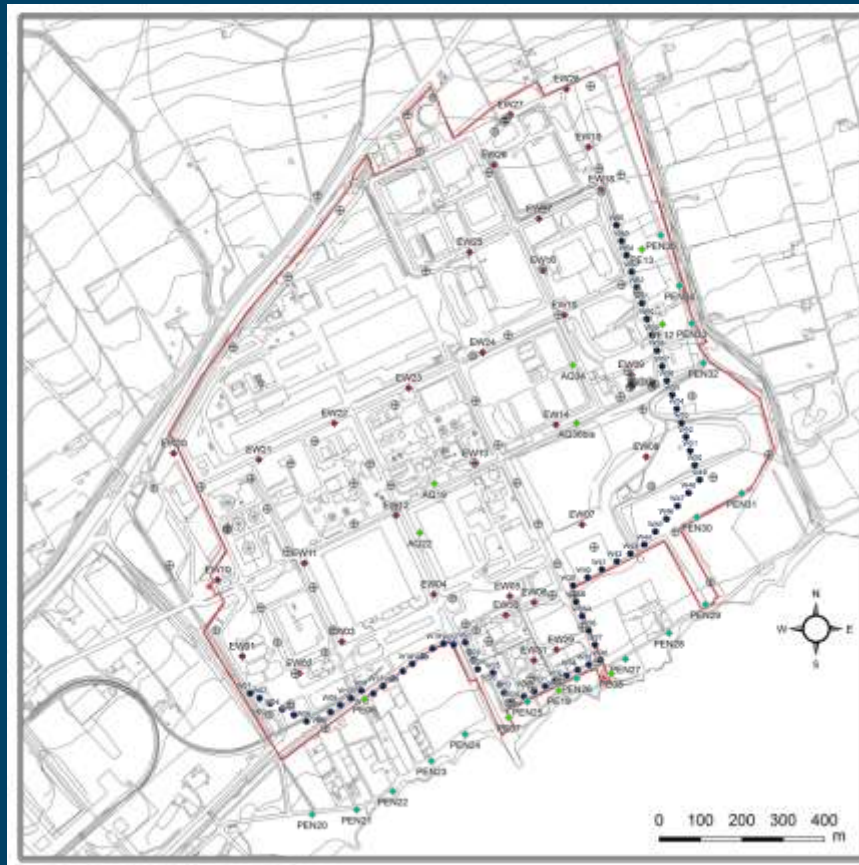
- a) Caratteristiche del sito e **obiettivi** del lavoro
- b) **Modello concettuale** idrogeologico
- c) Implementazione del **modello numerico**, calibrazione e validazione
- d) Simulazione degli **effetti** degli interventi attuali
- e) Simulazione degli scenari per **l'ottimizzazione** delle azioni di bonifica

a Caratteristiche del sito e obiettivi del lavoro

Caratteristiche del sito

Stabilimento chimico dismesso di 150 ha, prospiciente area costiera.

Bonifica/MISE delle acque sotterranee mediante:



- Sistema di emungimento (totale portata estratta $\approx 120 \text{ m}^3/\text{h}$):
 - ✓ 31 pozzi di emungimento interni + 26 piezometri interni/esterni in corrispondenza di punti hot-spot;
- Barriera di iniezione fronte mare, lunga oltre 2000 m (68 pozzi) portata iniettata $\approx 200 \text{ m}^3/\text{h}$
- Impianto di trattamento chimico-fisico, biologico (TAF)
- Rete di monitoraggio

Obiettivi

Sviluppare un modello numerico per:

- ✓ **simulare** gli effetti degli sistemi attuali;
- ✓ **ottimizzare** il bilancio idrico dei sistemi di emungimento e di iniezione

tramite

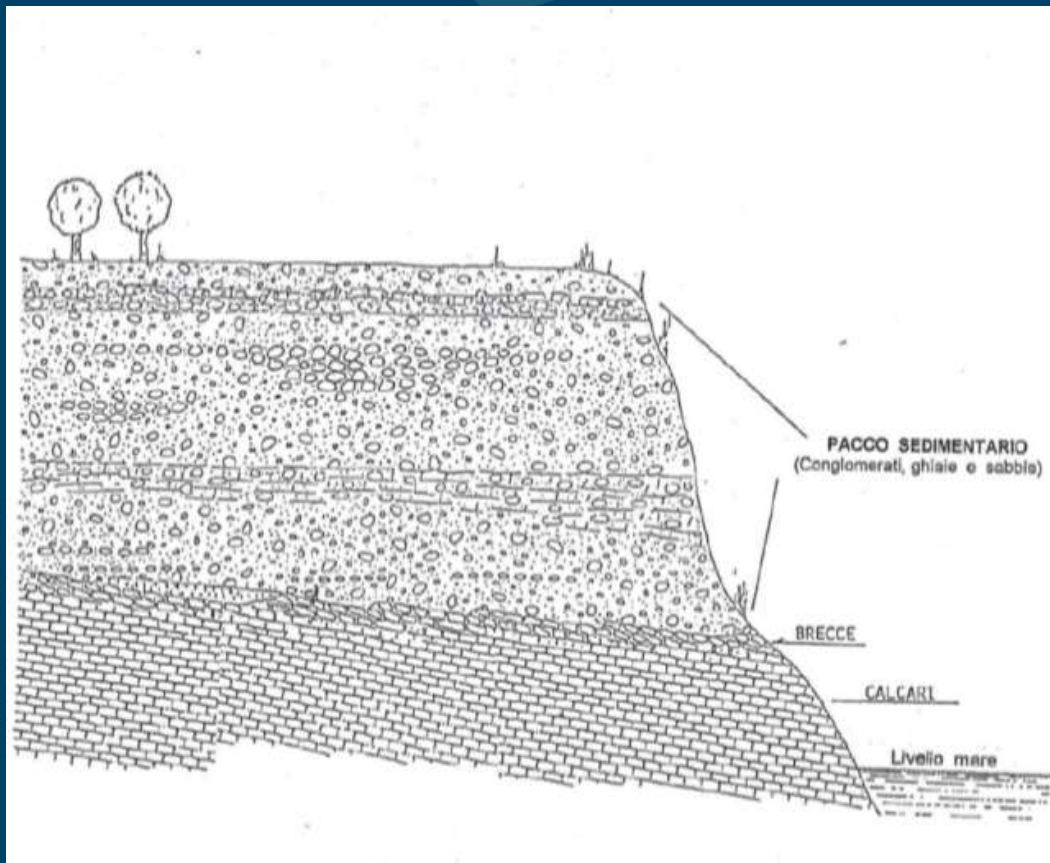
FEFLOW (V. 6.2)

Il modello è stato realizzato da URS Italia (ora AECOM), con la validazione scientifica del Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Prof. Alessandro Gargini.



Modello concettuale idrogeologico

Modello concettuale (geologia)

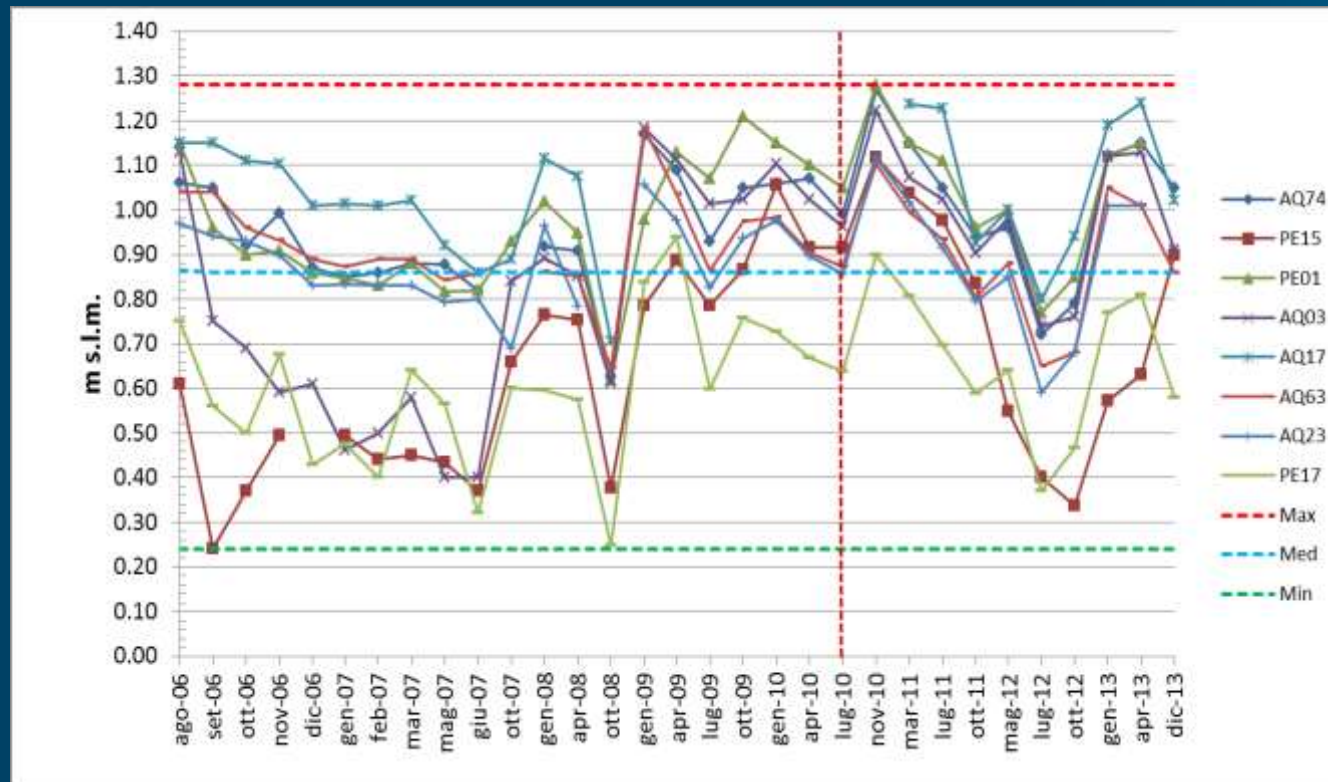


Sezione geologica schematica dell'area

- Serie detritico organogena, spessa mediamente 10 m
- Calcari tipo «*Craie*», teneri, spessore > 125 m.
- Alternanze di calcari clastici semilapidei, con orizzonti micritici, friabili.
- Piani di strato suborizzontali, grado di fratturazione anche elevato, a tratti sabbioni.

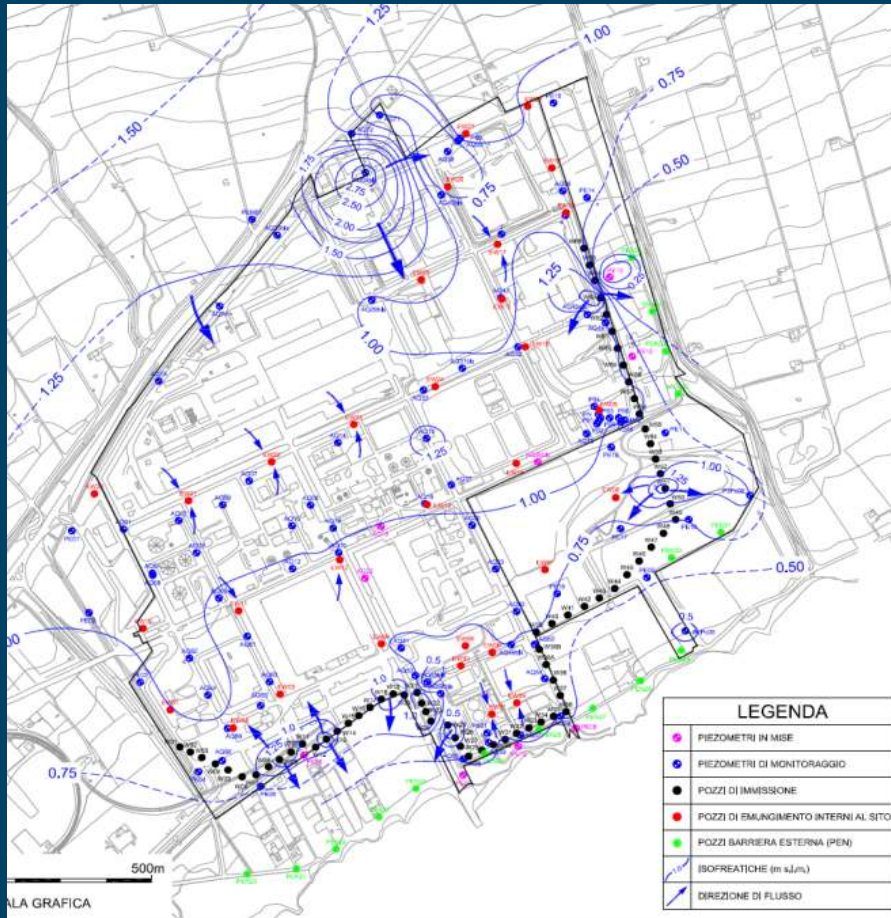
Modello concettuale (idrogeologia)

- Circolazione idrica nei calcari per doppia porosità
- Condizioni *prevalentemente* di tipo freatico
- Quota media $\approx 0,5$ m slm, oscillazioni stagionali modeste

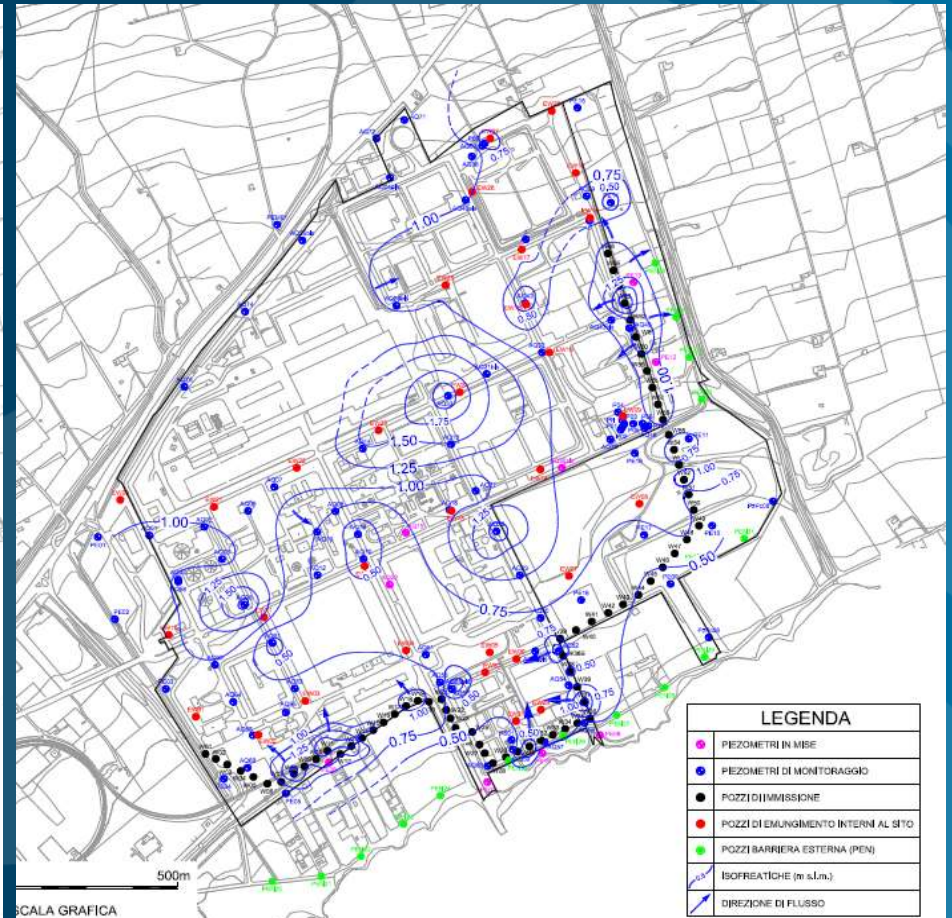


Andamento della falda (2006 – 2013)

Modello concettuale (idrogeologia)



Freatimetria – Luglio 2010



Freatimetria – Dicembre 2013

Implementazione del modello numerico

Scelta del codice numerico

Codice **FEFLOW**, adatto a rappresentare al meglio i gradi di complessità del caso in esame, infatti:

- la discretizzazione 3D agli elementi finiti consente il **massimo adattamento della griglia** alle geometrie orizzontali e verticali,
- FEFLOW possiede specifiche potenzialità di calcolo numerico relative a **fluidi a densità variabile** (acque dolci e acque salate)
- in presenza di **gradienti piezometrici elevati, anche verticali**, connessi alle attività di iniezione, i modelli alle differenze finite presentano limiti di applicabilità e affidabilità,
- per condizioni di falda a superficie libera dove si riscontri la **saturation/desaturazione** di uno o più layers FEFLOW offre specifiche funzionalità.

Dominio di Calcolo



Estensione del Dominio di Calcolo

- ✓ Dominio compreso tra i rilievi collinari a SW e la costa a NE
- ✓ Area dominio: 3,5 km x 2,5 km (>> area sito).
- ✓ Sulla verticale: base modello posta a -100 m s.l.m.

Griglia di Calcolo (1)

I dati predisposti in ArcMap sono stati importati in Feflow 6.2 come Supermesh elements. Gli elementi poligonali, lineari e puntuali sono stati utilizzati come **vincoli** per creare la griglia di calcolo agli elementi finiti, in modo da avere nodi posizionati in corrispondenza dei punti d'interesse.

Punti di emungimento e d'iniezione sono stati usati come **nodi** per generare e strutturare la griglia.

Il perimetro del sito è stato importato per **definire un'area** entro rifinire **la griglia**. La griglia di calcolo è stata generata utilizzando l'algoritmo "Triangle».

La griglia è stata **infittita** all'interno del sito ed in corrispondenza dei punti di pompaggio, in modo da riprodurre al meglio i gradienti più elevati ed estesa in direzione verticale (12 layers).

Ogni **Slice** della griglia comprende 86749 elementi triangolari, 43617 nodi.

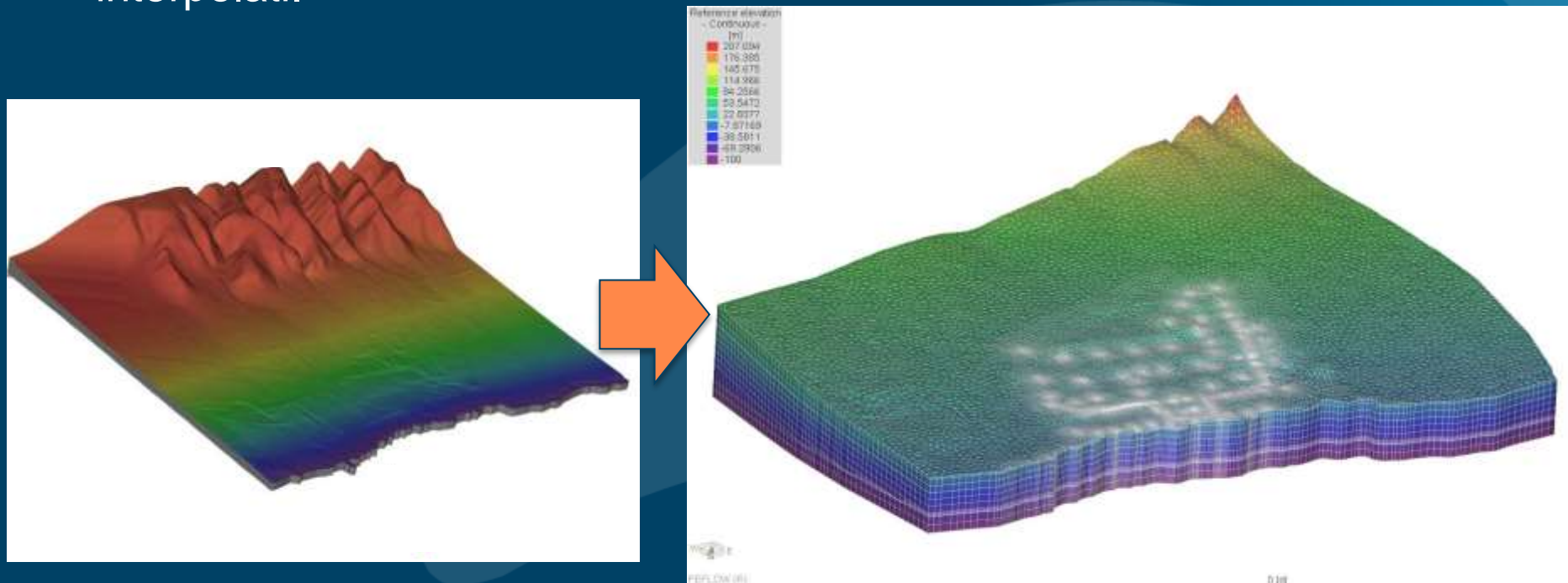


Elementi utilizzati per generare la Supermesh

Griglia di Calcolo (3)

Particolare attenzione è stata posta alla ricostruzione della **superficie topografica** e del **top dei calcari**.

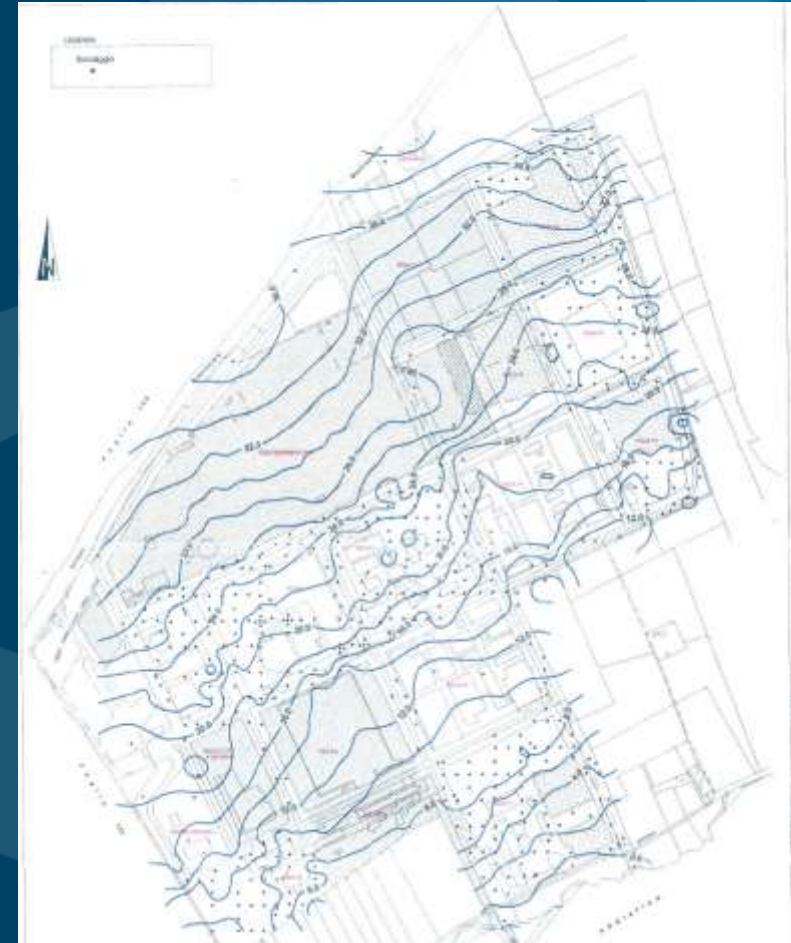
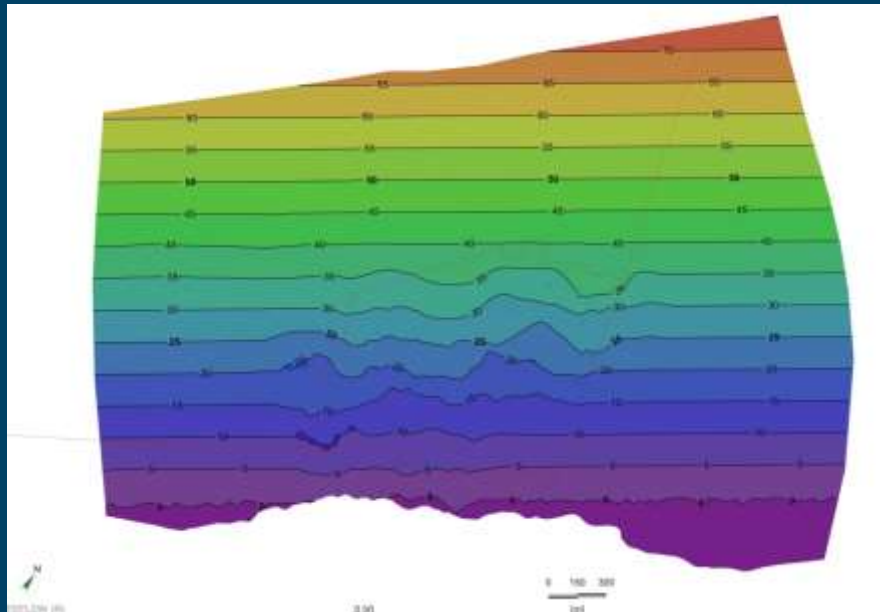
Superficie topografica: ricostruita partendo dai modelli di elevazione digitali del terreno, convertiti in shapefile di punti, importati in Feflow e interpolati.



Ricostruzione della Superficie Topografica

Griglia di Calcolo (4)

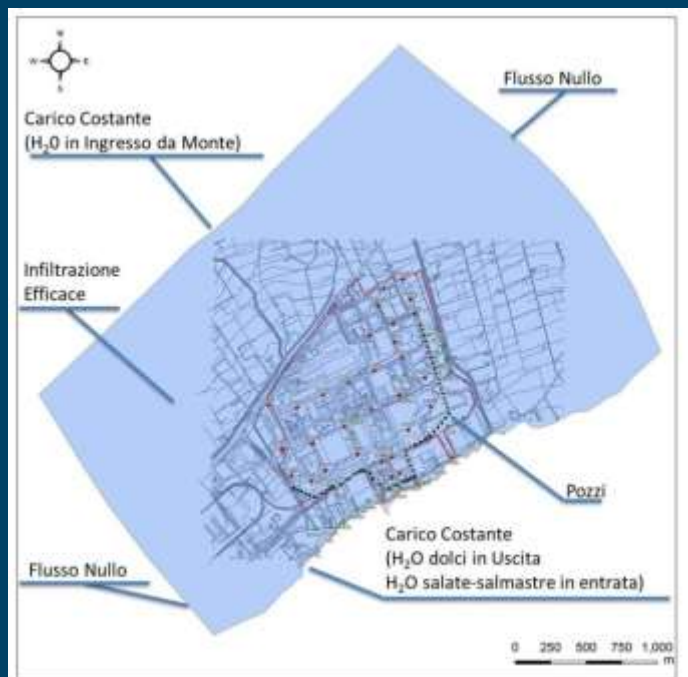
- ✓ **Top dei calcari** da dati di caratterizzazione del Sito (835 sondaggi).
- ✓ Isolinee digitalizzate come insiemi di punti in ArcMap.
- ✓ Andamento dei calcari nelle aree circostanti il sito: estrapolato



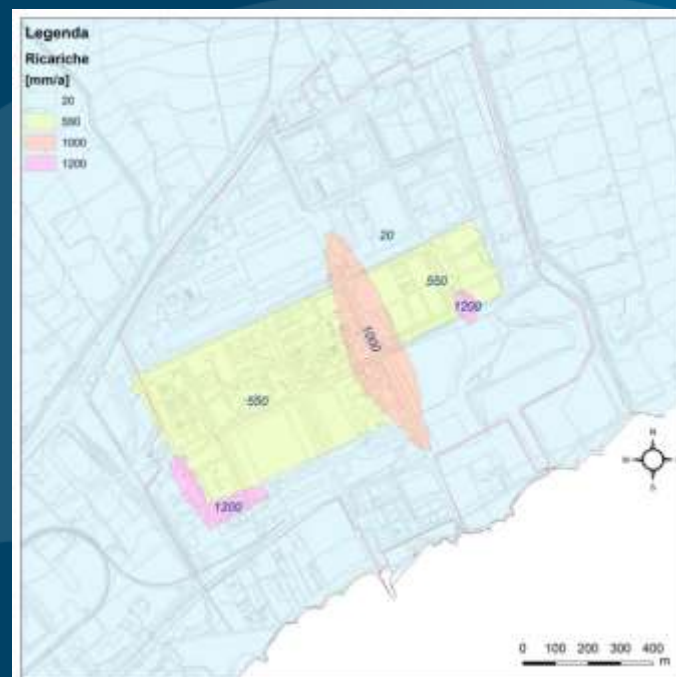
Dati Utilizzati per la ricostruzione del top dei calcari Mesozoici

Condizioni al Contorno

- A monte: **carico idraulico costante** (flusso di acqua dolce in ingresso al sito);
- lungo la linea di costa: **carico costante pari a 0 m s.l.m** ai primi 4 strati del modello (flusso di acqua dolce in uscita). Carichi incrementati in profondità sulla base di rapporto di densità tra acqua dolce e acqua salata;
- limiti orientale ed occidentale, parallelamente alle linee di flusso: **flusso nullo**;
- **ricarica zenitale** su dominio: 20 mm/anno. All'interno del sito valori incrementati per fenomeni di ricarica locale;
- all'interno: **pozzi** di iniezione ed emungimento.



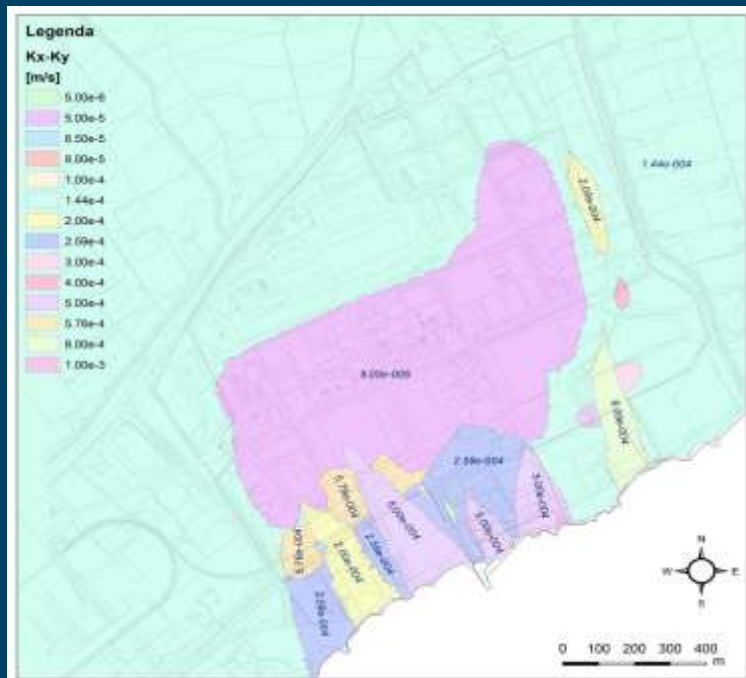
Condizioni al contorno



Valori di Ricarica

Parametri Idraulici

- Approccio del **Mezzo Poroso Equivalente** (Domenico & Schwartz, *Physical and Chemical Hydrogeology book, Section 3.4, 1990*; Rayne et al. 2001).
- A larga scala il comportamento di un acquifero fratturato può essere **assimilabile** al comportamento di un acquifero poroso (Long et al. 1982; Boni e Petitta, 1994)
- Parametri idraulici derivati **dalle prove di pompaggio a lunga durata**: valori di conducibilità idraulica modulati in calibrazione in linea con i valori di un acquifero quale quello in esame ($10^{-3} \div 5e^{-6}$ m/s) (Price, 1987; Downing et al. 1993; Allen et al. 1997).



- Valori più elevati (fino a 10^{-3} m/s) in corrispondenza di orizzonti particolarmente carsificati (o presenza di cavità)
- Ai 2 layers inferiori del modello (-70÷-100 m s.l.m) valori di K di un ordine di grandezza inferiori.

Conducibilità Idraulica ($K_x = K_y$; $K_z = 1/10 K_x$)

Calibrazione del Modello (1)

Calibrazione in **regime stazionario** su scenario prescelto (condizioni ordinarie)



Obiettivo: riprodurre le caratteristiche della piezometria misurata in **64** piezometri e in **68** pozzi di iniezione (targets)



Processo *trial and error*



Verifica della calibrazione:

Qualitativa

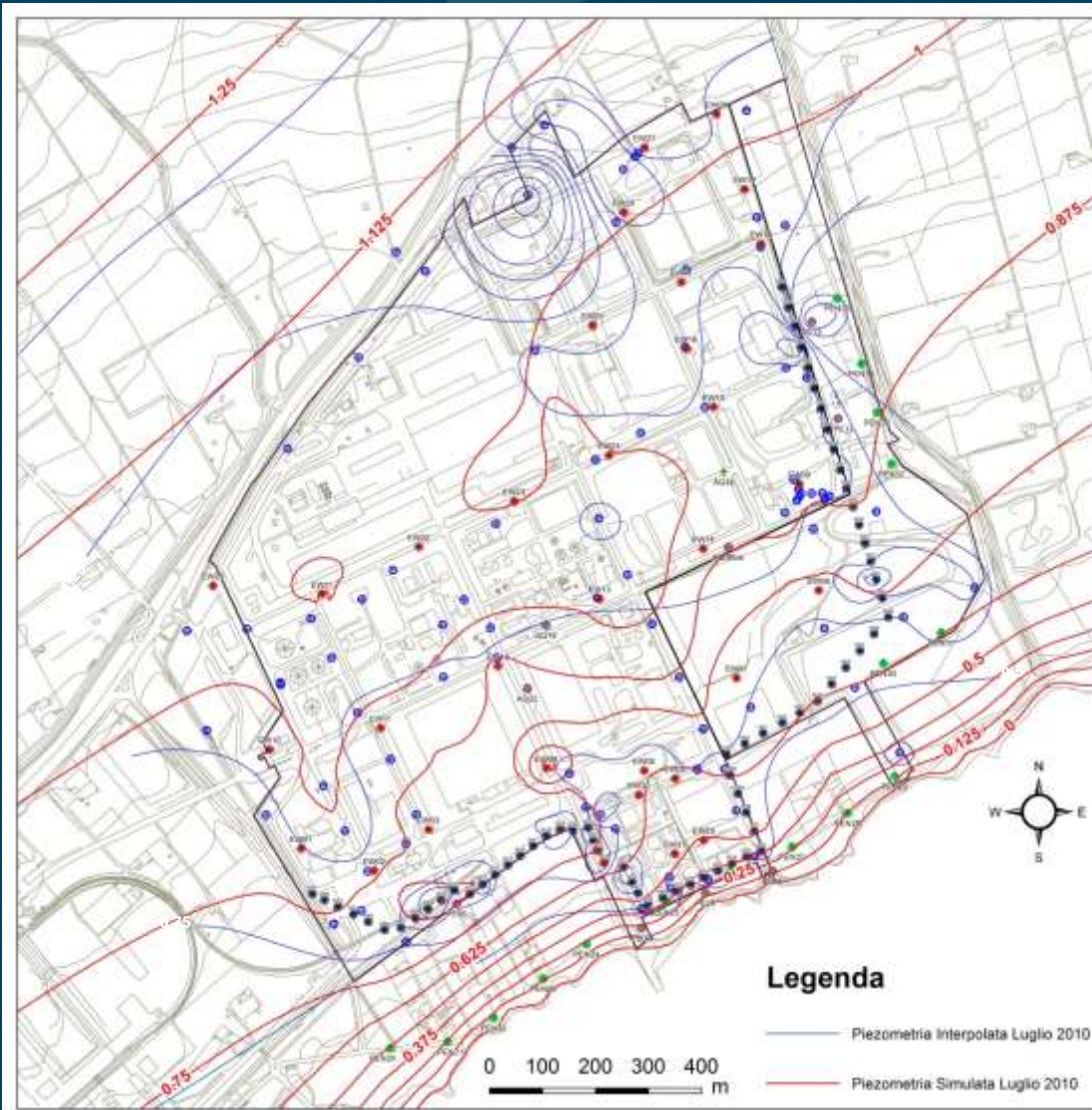
confronto visivo tra la freatimetria interpolata e freatimetria modellata.



Quantitativa

analisi statistica dei residui di calibrazione

Calibrazione del Modello (2)

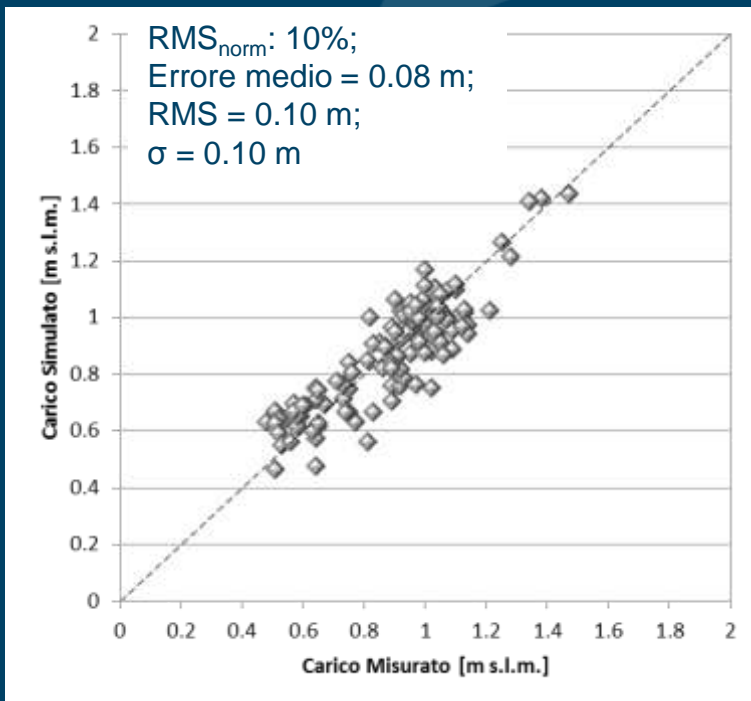


La freaticcia simulata riproduce il **motivo**, la **direzione** di deflusso ed i **gradienti** idraulici della freaticcia derivante dall'interpretazione dei dati rilevati

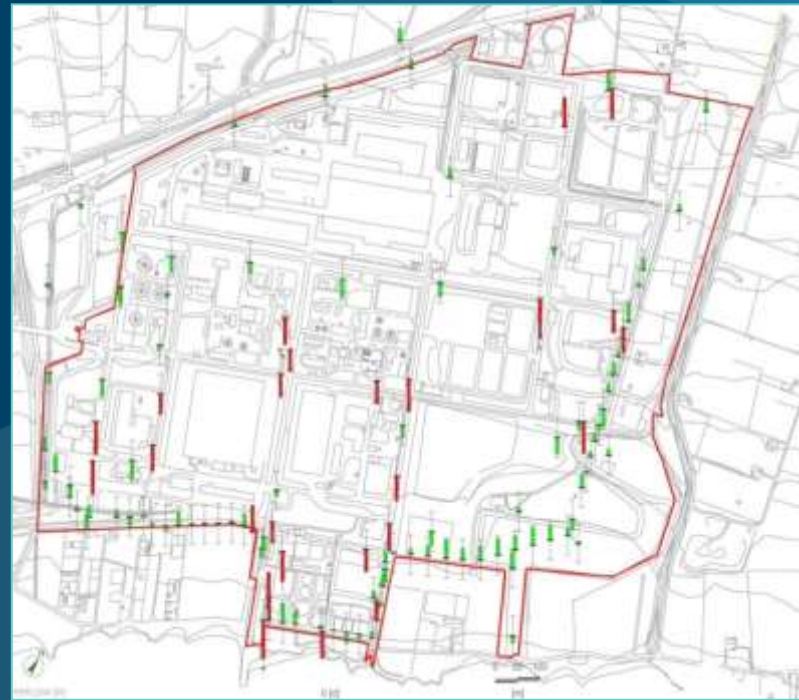
Confronto tra piezometria Interpolata e piezometria Simulata



Calibrazione del Modello (3)



Retta di Calibrazione – Luglio 2010



Distribuzione dei residui – Luglio 2010

Residui generalmente inferiori a 0,10 m. Errori leggermente superiori in aree di ricarica localizzata o di maggiori incertezze su parametri idraulici.

Il modello è stato **calibrato** e quindi **validato** (nov. 2013 e dic. 2013): rappresenta uno strumento idoneo per valutare gli effetti degli attuali sistemi e per simulare scenari futuri.

Calibrazione del Modello (4)

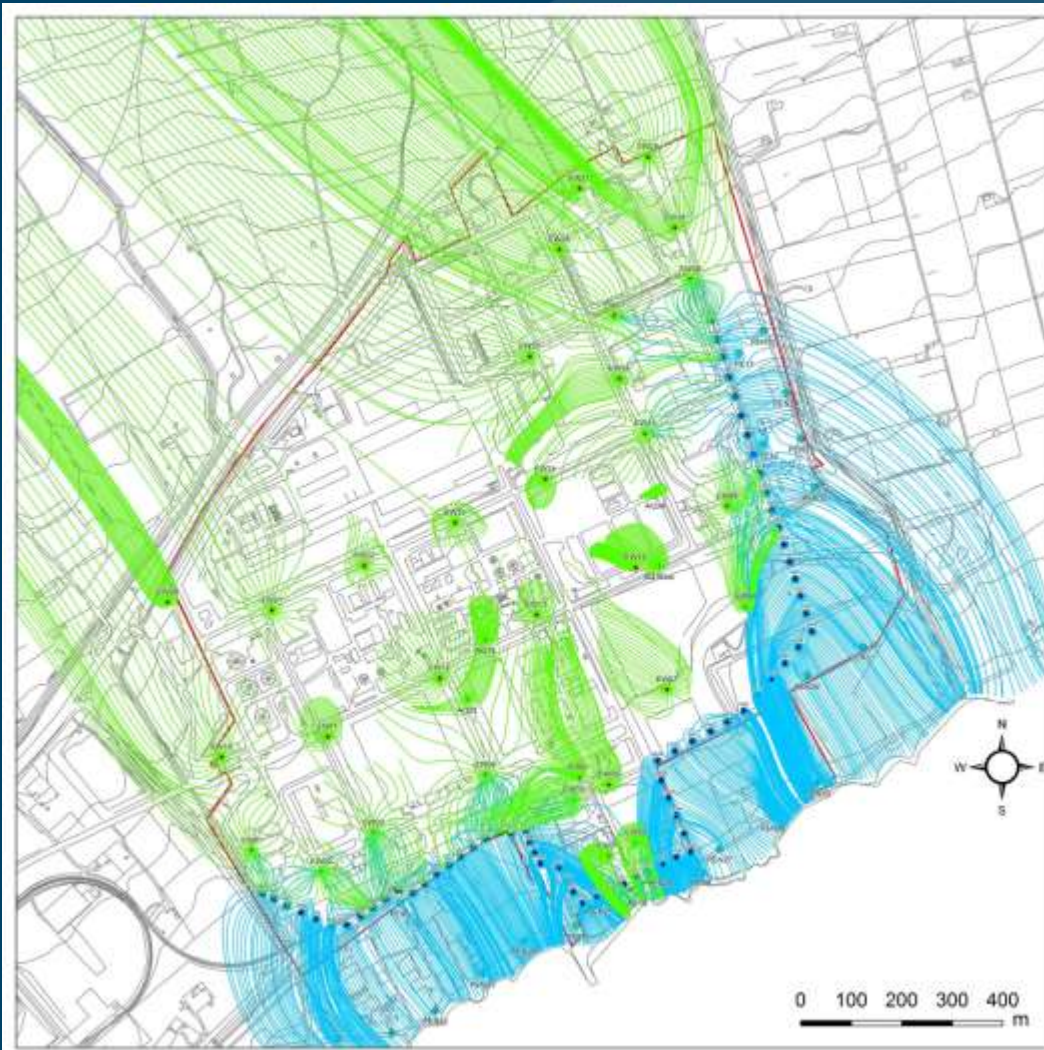
Verifica del bilancio idrico

| Intero Dominio | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-----------------|--------|-------------------|------------------|--------|
| | Ingresso | | | | Uscita | | |
| Flussi | Flusso da Monte | Ricarica | Pozzi Iniezione | Totale | Pozzi Emungimento | Flusso in Uscita | Totale |
| Valore [m ³ /h] | 776 | 39 | 214 | 1029 | -121 | -907 | 1028 |

| Sito | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-----------------|--------|-------------------|------------------|--------|
| | Ingresso | | | | Uscita | | |
| Flussi | Flusso da Monte | Ricarica | Pozzi Iniezione | Totale | Pozzi Emungimento | Flusso in Uscita | Totale |
| Valore [m ³ /h] | 26 | 21 | 214 | 261 | -121 | -140 | 261 |

Simulazione degli effetti degli interventi attuali

Simulazione degli effetti degli interventi attuali



acque di iniezione in modalità forward (azzurro)
acque emunte in modalità backward (verde)

- Le acque provenienti da monte vengono intercettate dai pozzi di emungimento o deviate e non vengono in contatto con le aree interne del sito
- Le acque di iniezione fluiscono in parte verso mare e in parte verso i pozzi di emungimento interni.

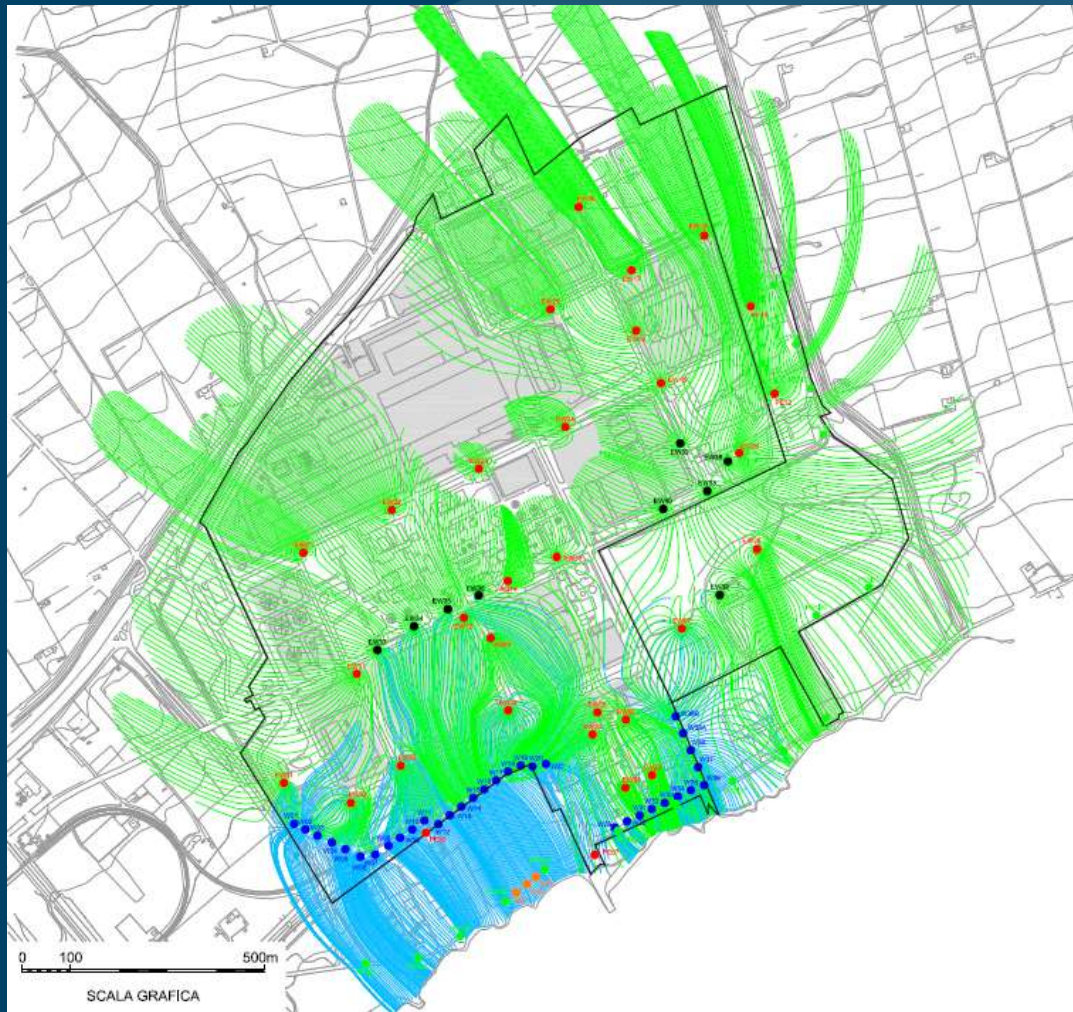
e Simulazione degli scenari per l'ottimizzazione
delle azioni di bonifica

Simulazione degli scenari per l'ottimizzazione delle azioni di bonifica

Il modello è stato utilizzato per verificare la possibilità di:

- 1. Potenziare** le azioni di emungimento nelle aree di nucleo di contaminazione
- 2. Redistribuire** le portate di emungimento dei pozzi interni sulla base dell'attuale distribuzione della contaminazione
- 3. Spegnerne** progressivamente i pozzi di emungimento esterni conformi
- 4. Razionalizzare** il bilancio idraulico fra acqua emunta e acqua reimpressa, per preservare risorse idriche di pregio.

Simulazione degli effetti degli interventi futuri



acque di iniezione in modalità forward (azzurro)
acque emunte in modalità backward (verde)

1. Potenziamento degli emungimenti *interni* ai nuclei di contaminazione: **170** m³/h
2. Cessazione dei prelievi nei punti conformi
3. Razionalizzazione delle azioni di immissione: **120** m³/h

Simulazione degli effetti degli interventi futuri

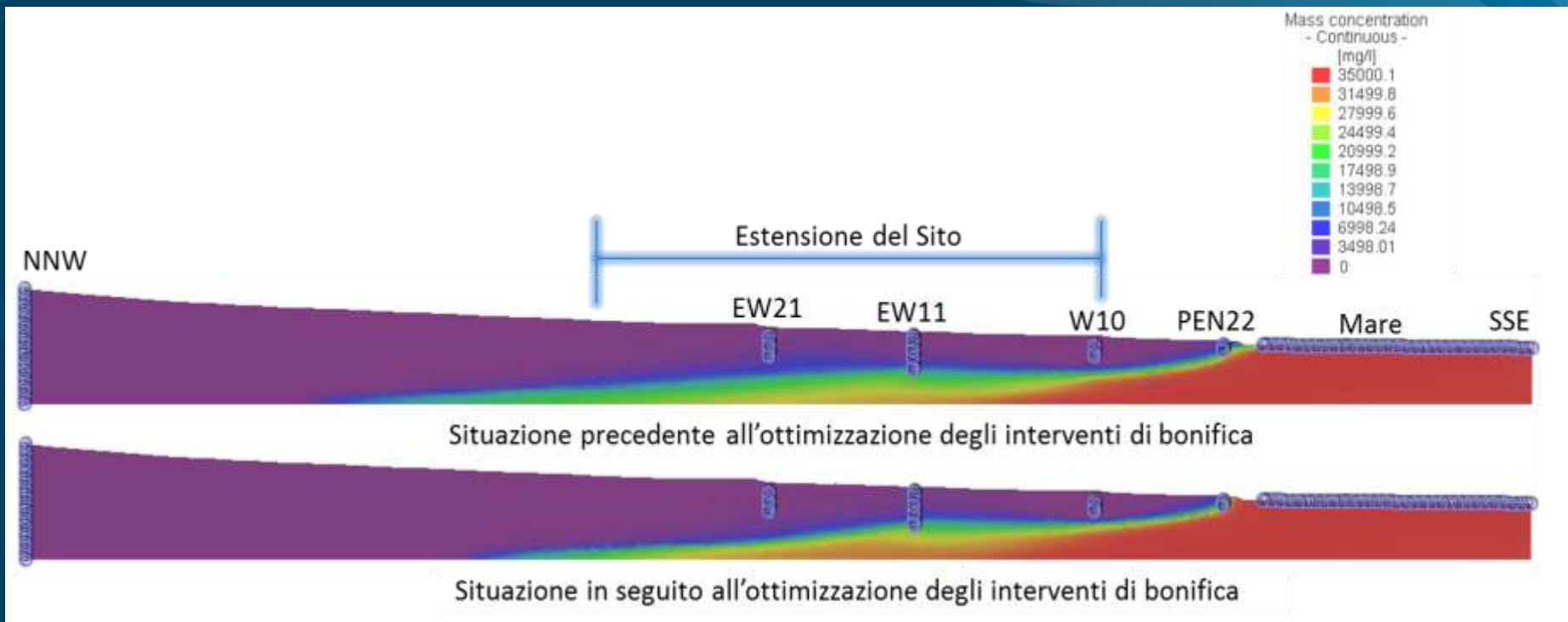
Effetti sul bilancio idrico di sito

| Sito - Gestione attuale | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-----------------|--------|-------------------|------------------|--------|
| Flussi | Ingresso | | | | Uscita | | |
| | Flusso da Monte | Ricarica | Pozzi Iniezione | Totale | Pozzi Emungimento | Flusso in Uscita | Totale |
| Valore [m ³ /h] | 26 | 21 | 214 | 261 | -121 | -140 | -261 |

| Sito - Gestione futura | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-----------------|--------|-------------------|------------------|--------|
| Flussi | Ingresso | | | | Uscita | | |
| | Flusso da Monte | Ricarica | Pozzi Iniezione | Totale | Pozzi Emungimento | Flusso in Uscita | Totale |
| Valore [m ³ /h] | 37 | 21 | 120 | 178 | -170 | -22 | -192 |

Simulazione degli effetti degli interventi futuri

Effetti sul cuneo salino (sezioni 2D)



Modelli 2d a densità variabile per la simulazione della dinamica del cuneo salino.

Conclusioni

Tramite il modello numerico **sono stati raggiunti gli obiettivi** del progetto, in particolare:

- sono stati esaminati gli effetti dei sistemi di bonifica/contenimento in atto, valutando i quantitativi di flusso afferenti al sito ed individuando i margini di ottimizzazione per la prosecuzione degli interventi.
- Sono stati identificati e valutati gli effetti delle proposte di ottimizzazione future, permettendo di potenziare le azioni di emungimento nei nuclei residui di contaminazione e migliorare il bilancio idrico tra acque emunte e immesse.

Grazie

Elena Leale, Fabio Canova

AECOM - Ragione Sociale URS Italia S.p.A.



Torino, 14-15 Ottobre 2015

