



MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE



Commissario di Governo per le Bonifiche e
la Tutela delle Acque nella Regione Campania



ACCORDO DI PROGRAMMA

Per la definizione degli interventi di messa in sicurezza e bonifica delle aree comprese
nel Sito di Interesse Nazionale di Napoli Orientale



**INTERVENTI DI MESSA IN SICUREZZA E BONIFICA DELLA FALDA
DEL SIN NAPOLI ORIENTALE E REALIZZAZIONE DELLA PRIMA FASE ATTUATIVA
PROGETTO DEFINITIVO**

Titolo elaborato
**MODELLO IDROGEOLOGICO DI FALDA E
DI TRASPORTO DEI CONTAMINANTI
2/5**

Tavola
ED 04

Redatto da



Project Manager :
Ing. Rosanna GRADO

IL DIRETTORE TECNICO
Ing. Carlo MESSINA



Redatto da :

Geol. A. CARLONI (modello idrogeologico)

Il Responsabile
del Procedimento
Ing. Pasquale PARENTE

Cod. Commessa

Codice

Nome file

Data : Maggio 2016

CAM 805

PD

ED

0

0

4

rev.
2

CAM805_PDEG004_2

Rev. Data Descrizione modifica

verificato

approvato

0	lug/2015	1ª Emissione
1	gen/2016	2ª Emissione CdS Istruttoria MATTM 7/10/2015
2	mag/2016	3ª Emissione Riunione Tecnica MATTM 8/4/2016

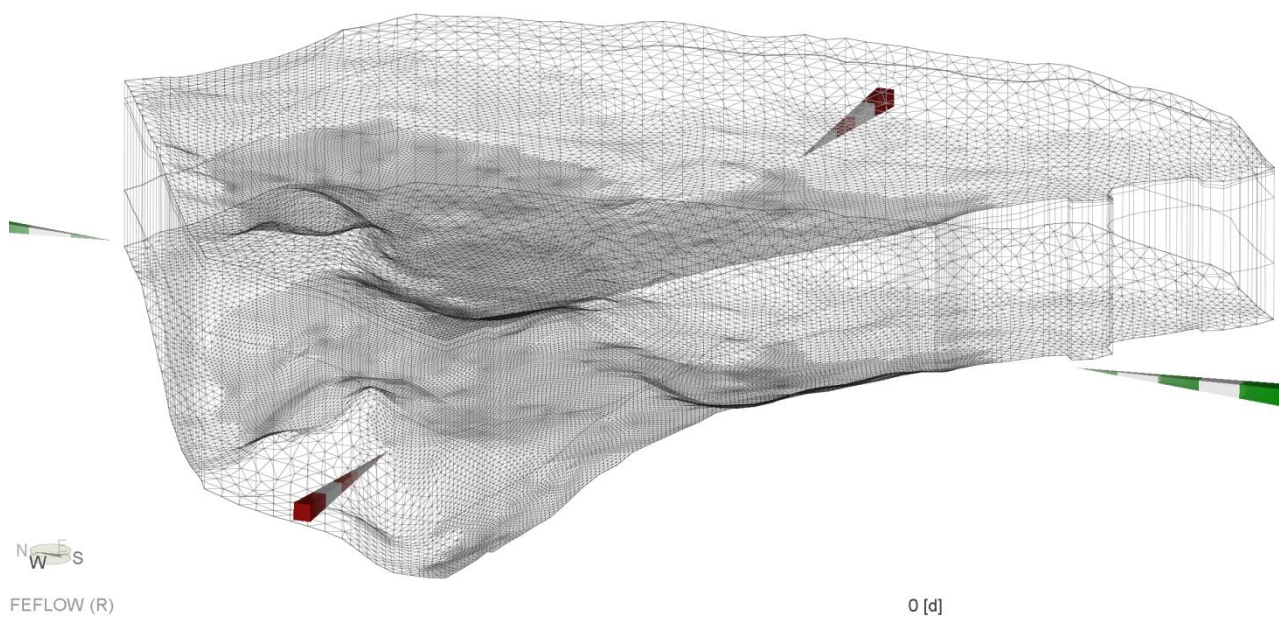


Figura 38 - Modello discreto 3D: Mesh e Griglia di calcolo.

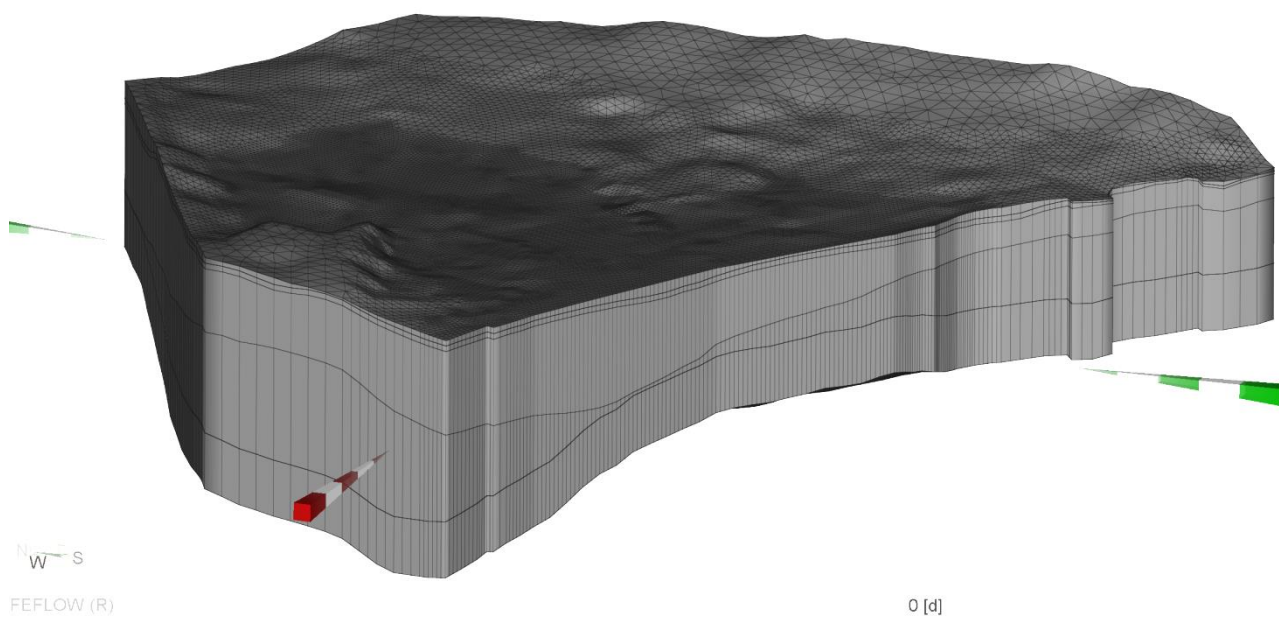


Figura 39 - Modello discreto 3D: Layers e Slices.

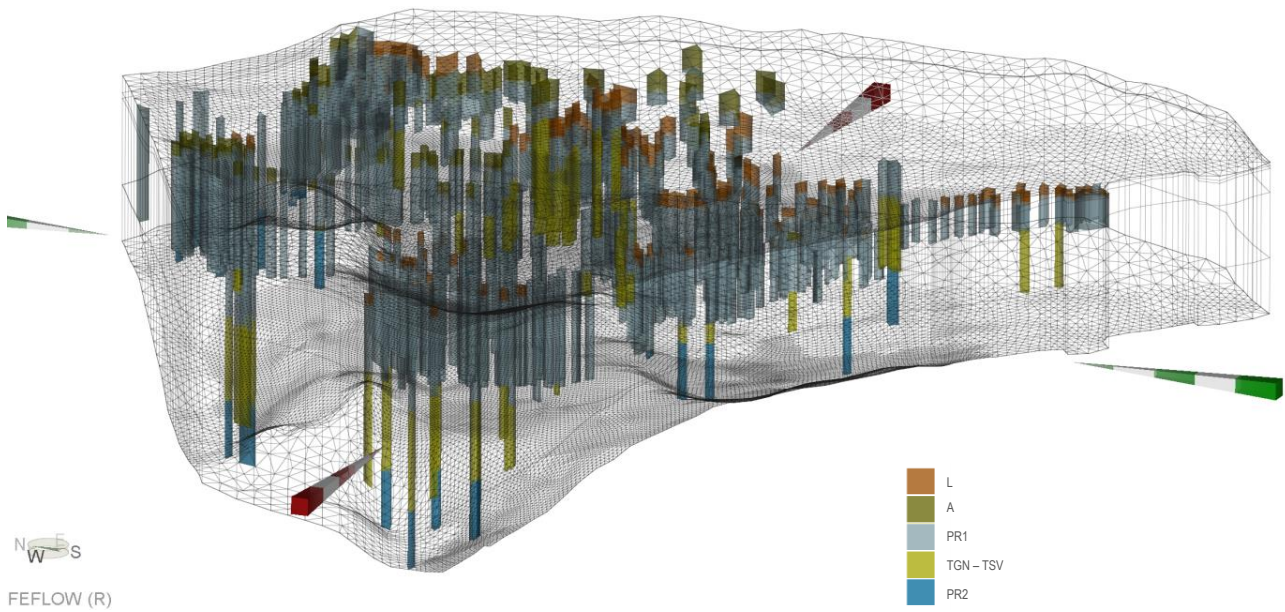


Figura 40 - Proiezione dei sondaggi stratigrafici nel dominio di calcolo.

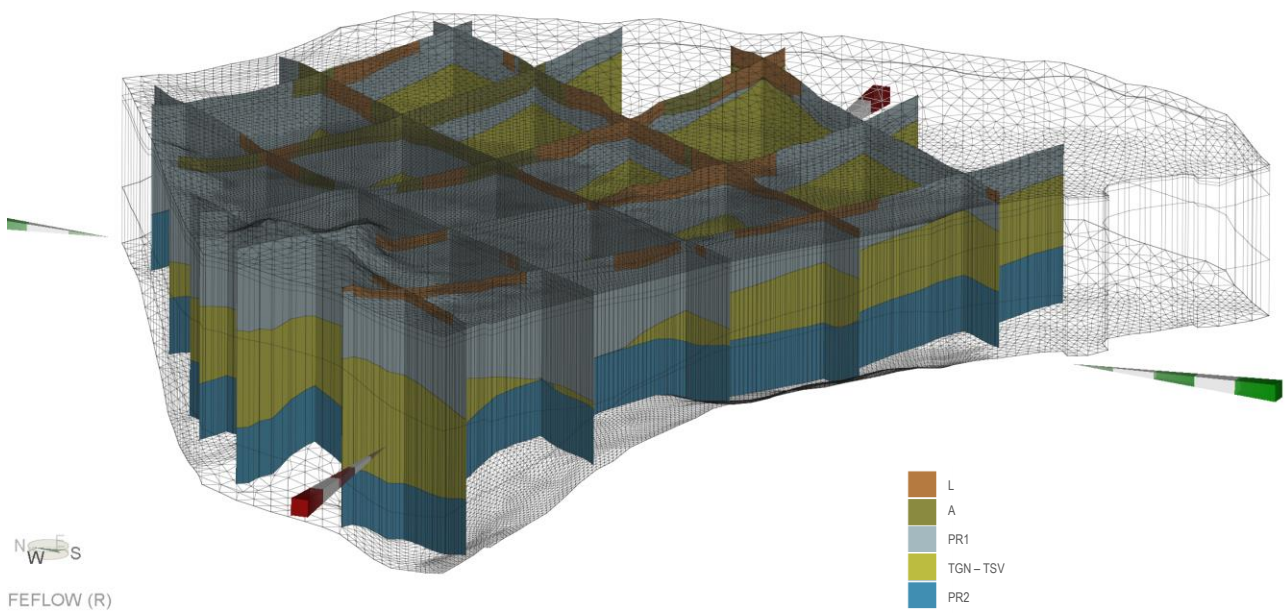


Figura 41 - Sezioni stratigrafiche E-W e N-S del modello geologico.

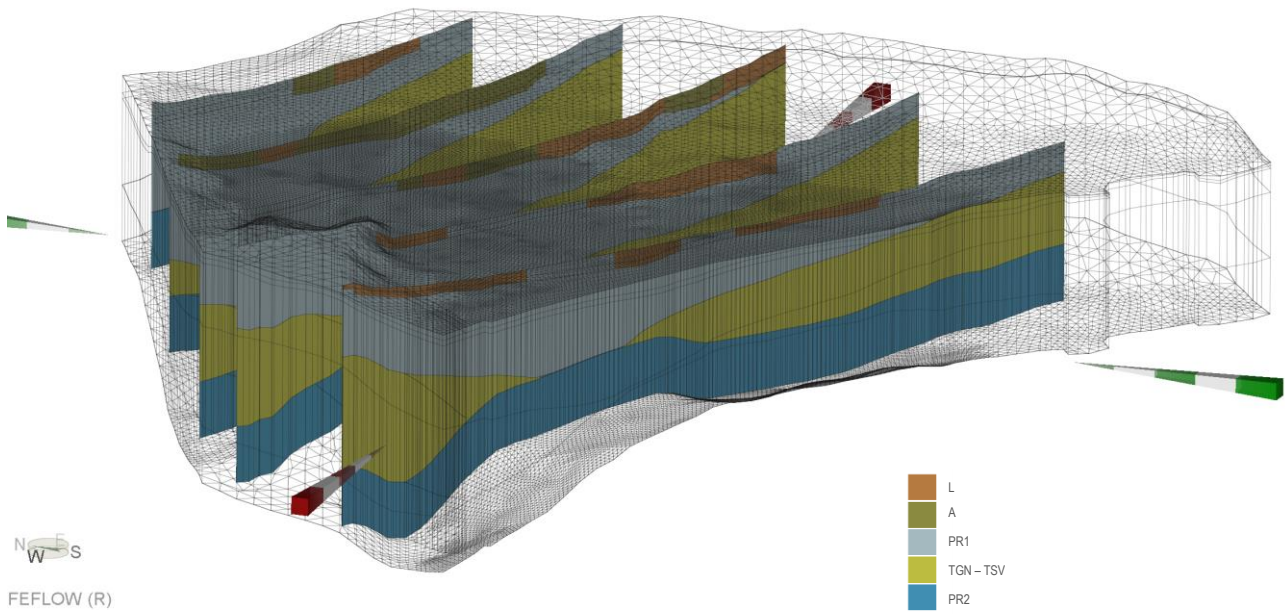


Figura 42 - Sezioni E-W del modello geologico.

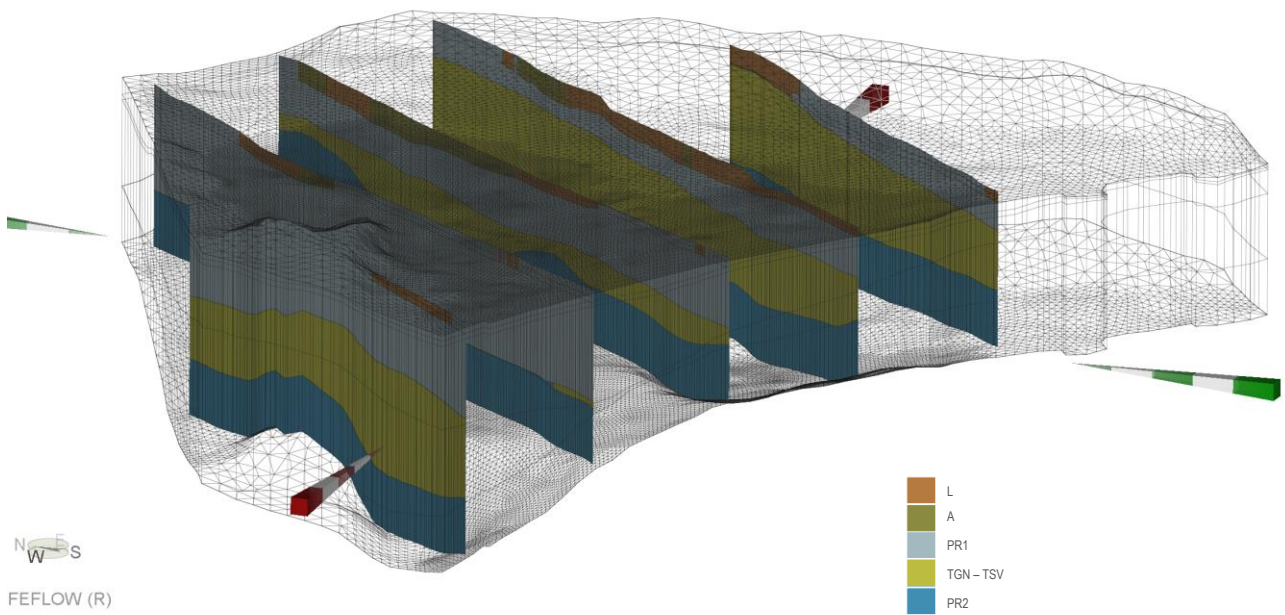


Figura 43 - Sezioni N-S del modello geologico.

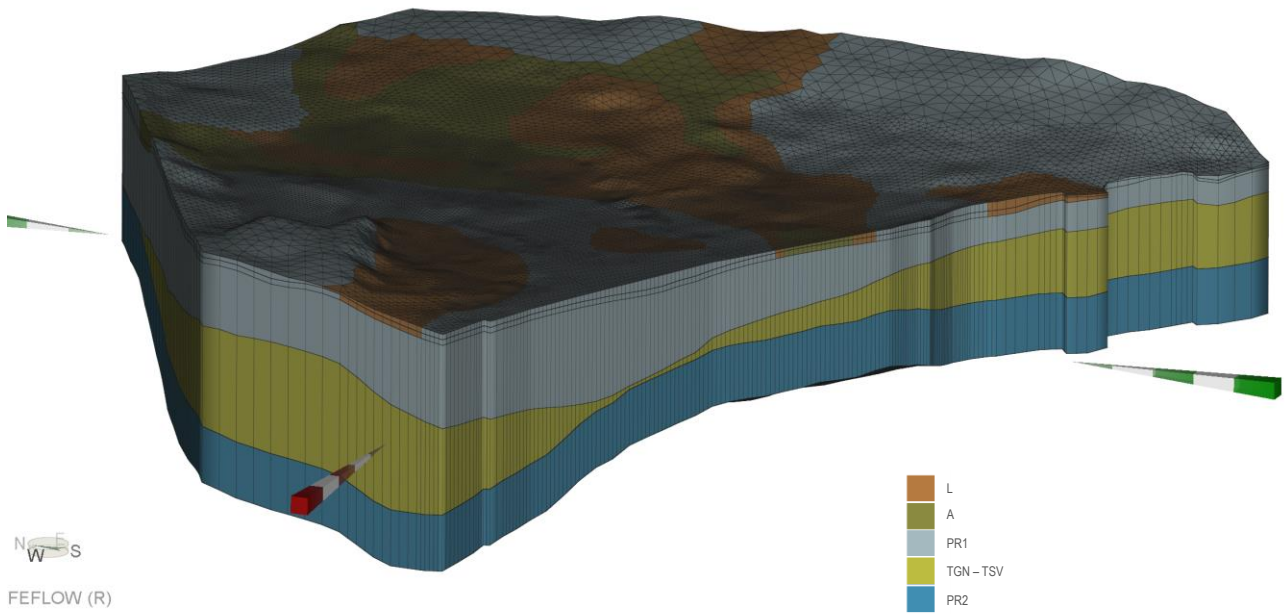


Figura 44 - Ricostruzione 3D del modello geologico.

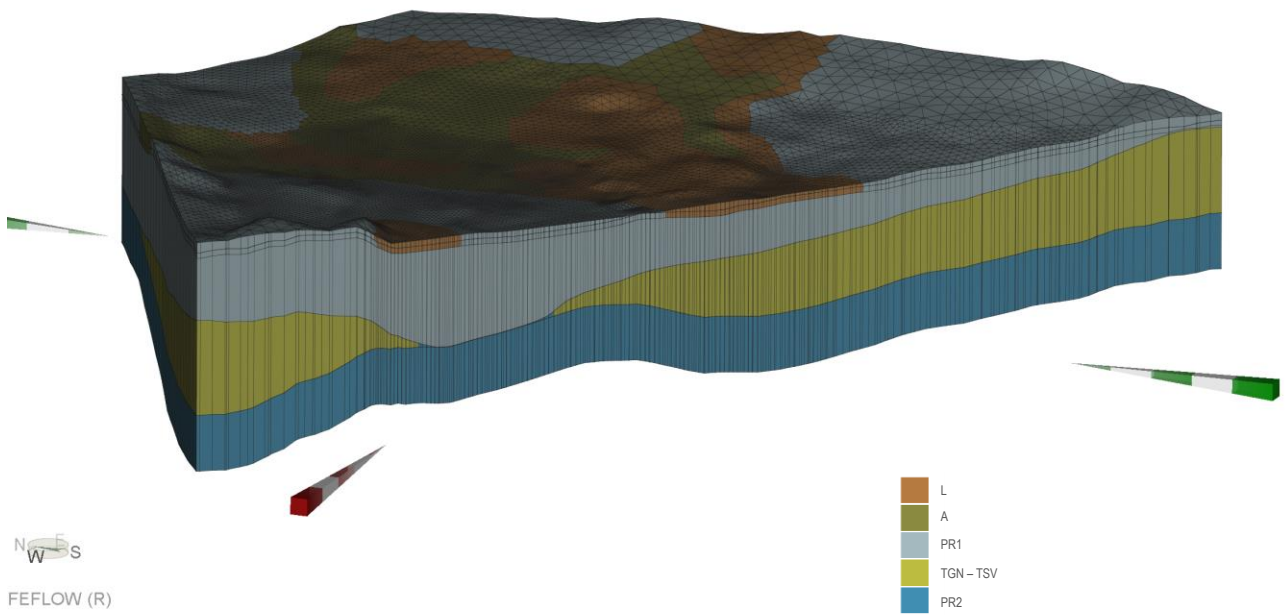


Figura 45 - Sezione verticale E-W del modello geologico 3D.

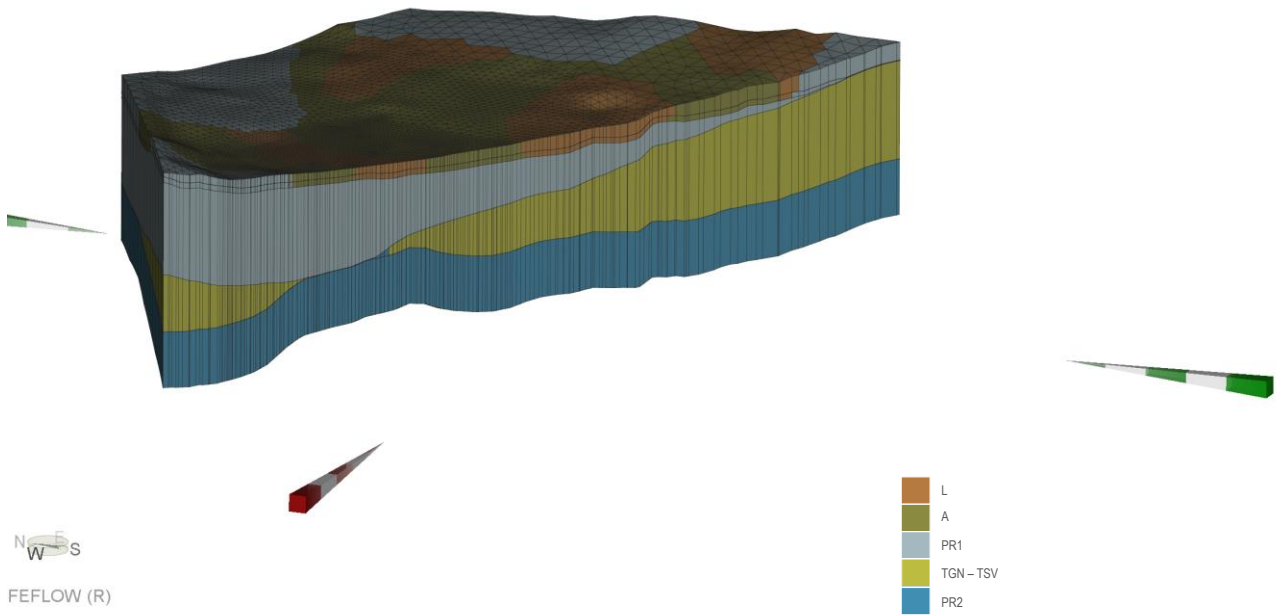


Figura 46 - Sezione verticale E-W del modello geologico 3D.

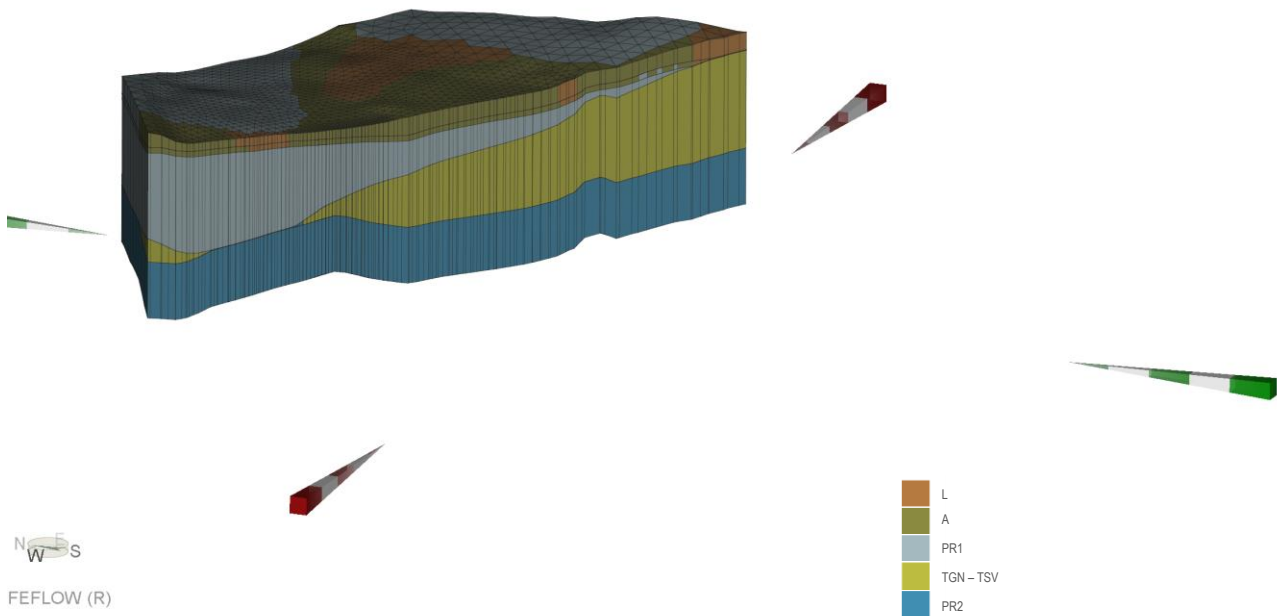


Figura 47 - Sezione verticale E-W del modello geologico 3D.

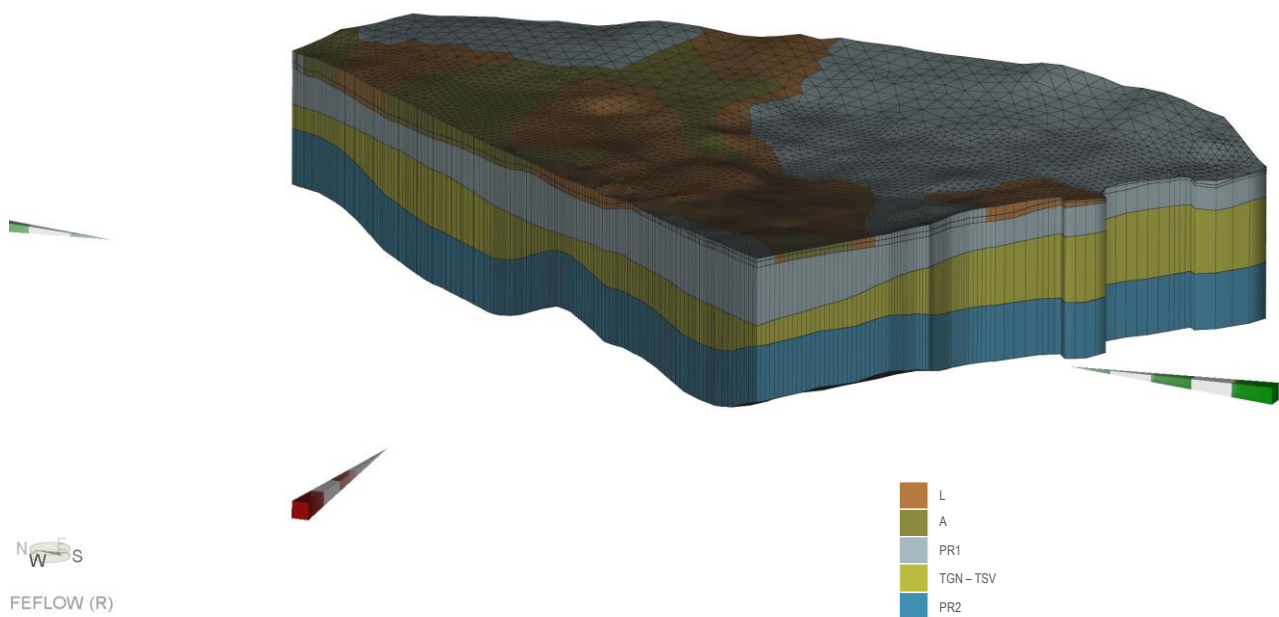


Figura 48 - Sezione verticale N-S del modello geologico 3D.

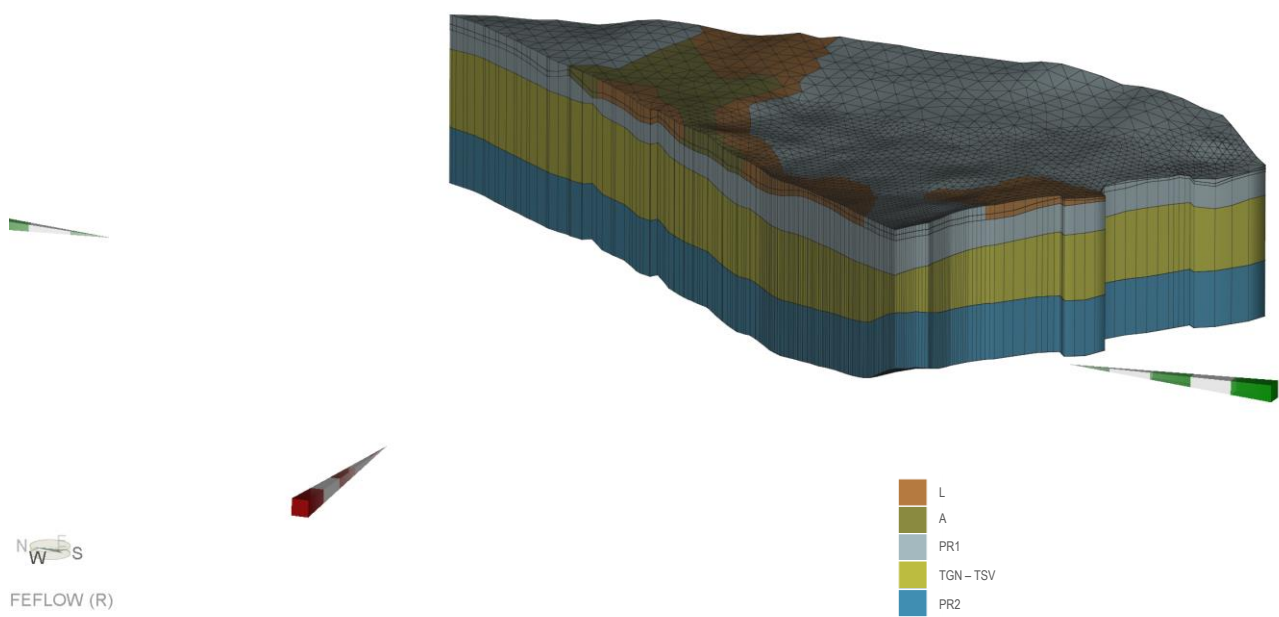


Figura 49 - Sezione verticale N-S del modello geologico 3D.

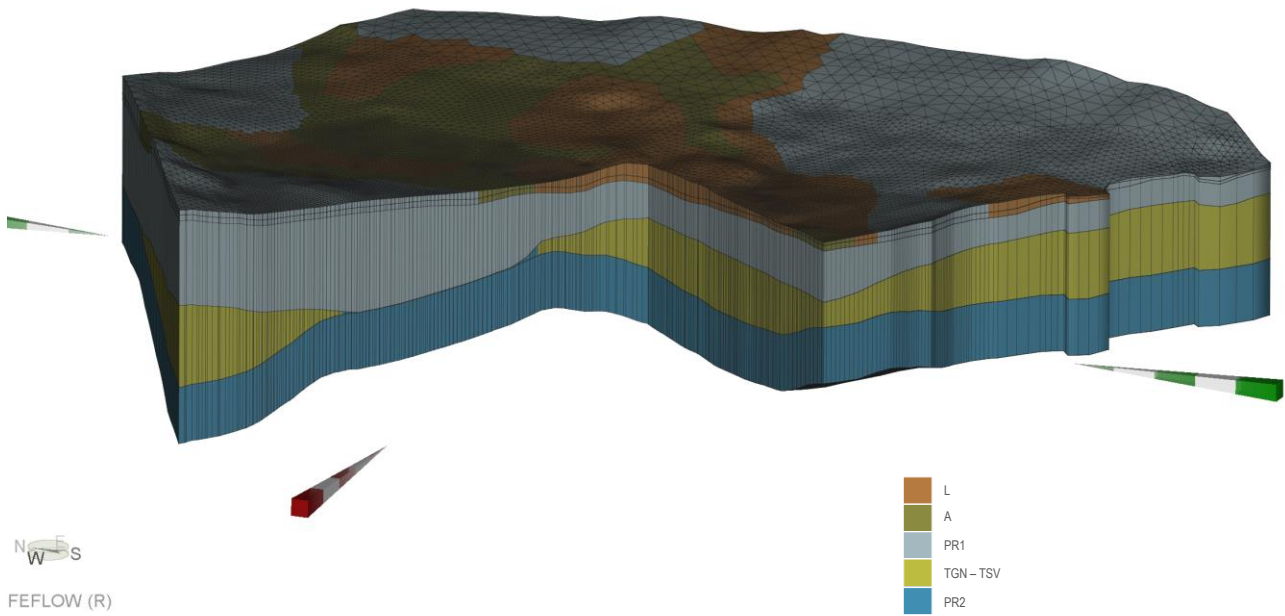


Figura 50 - Sezione verticale E-W e N-S del modello geologico 3D.

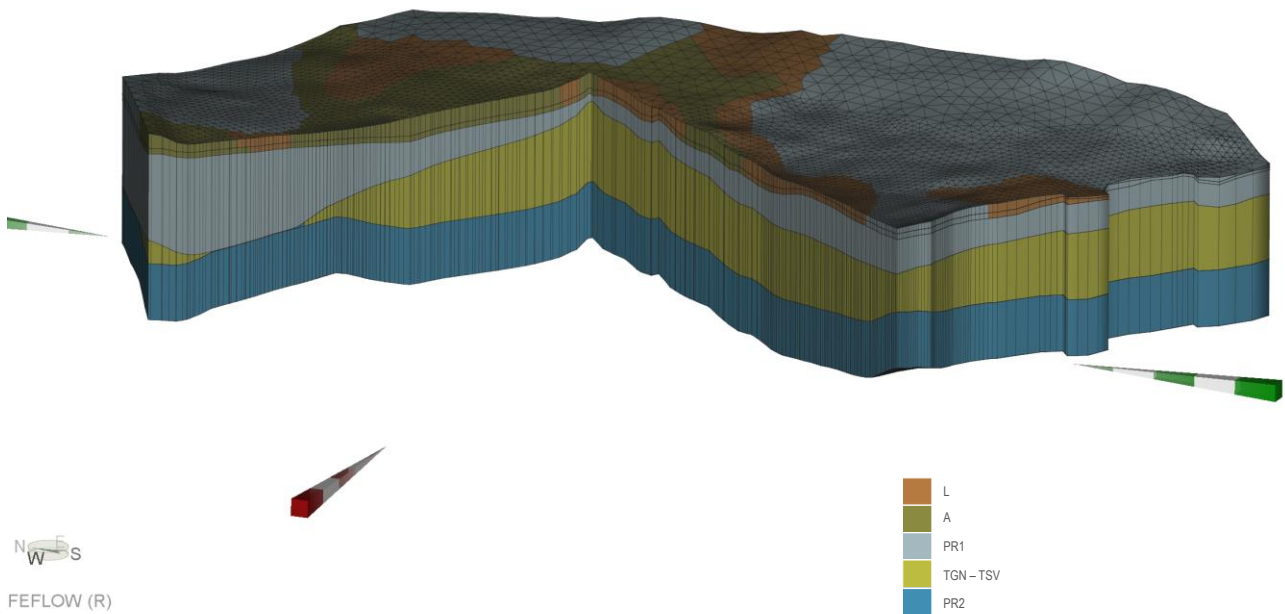


Figura 51 - Sezione verticale E-W e N-S del modello geologico 3D.

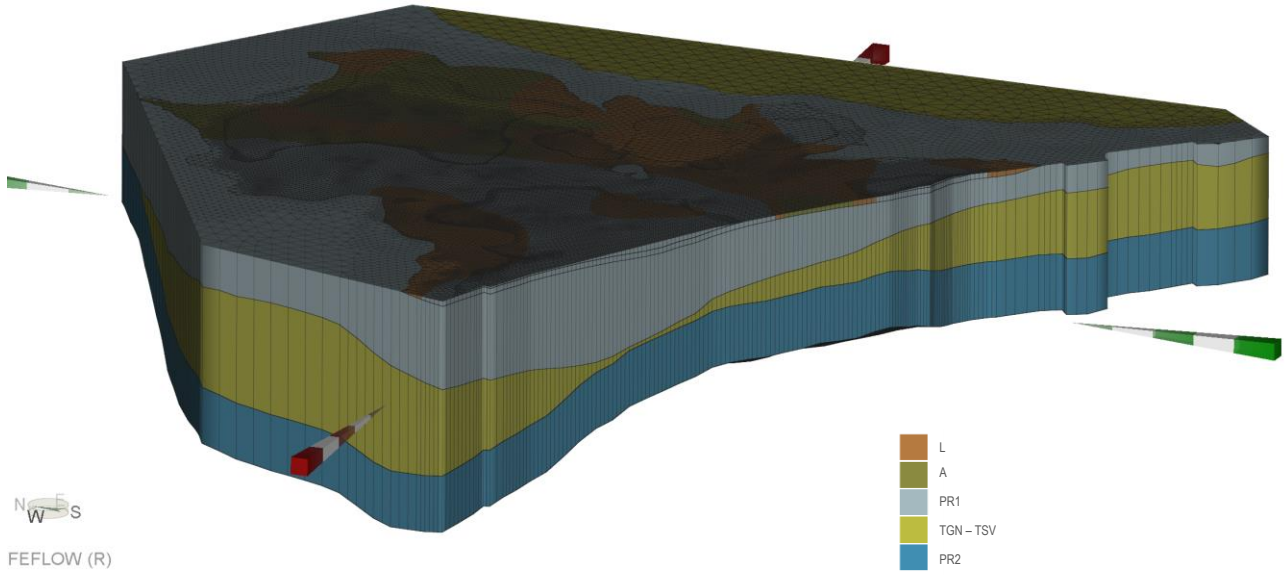


Figura 52 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota 0 metri s.l.m).

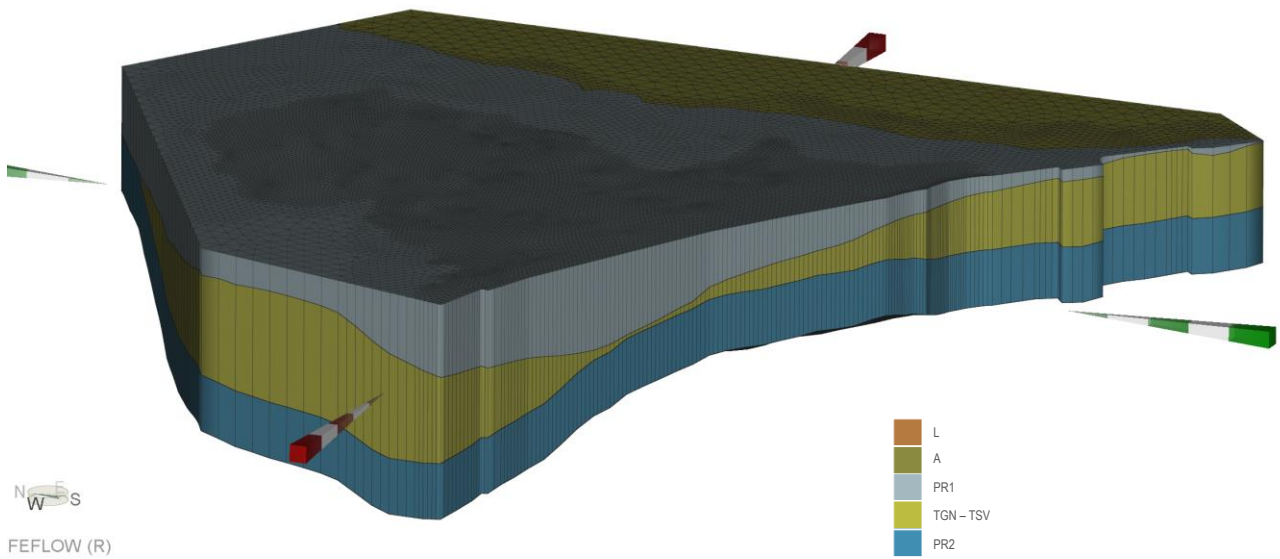


Figura 53 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -5 metri s.l.m).

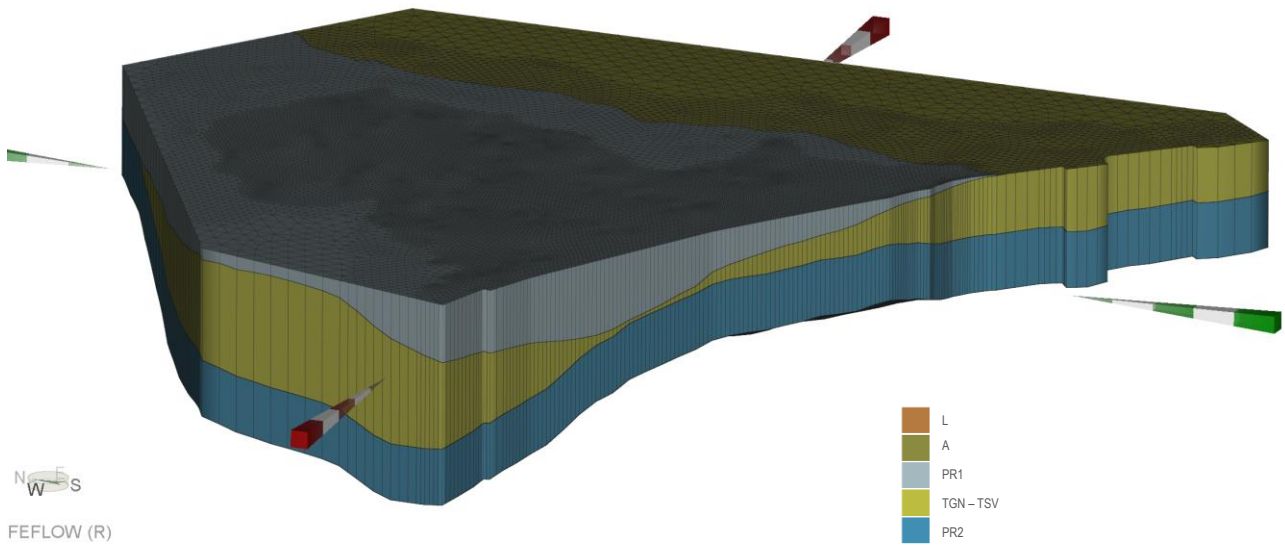


Figura 54 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -10 metri s.l.m).

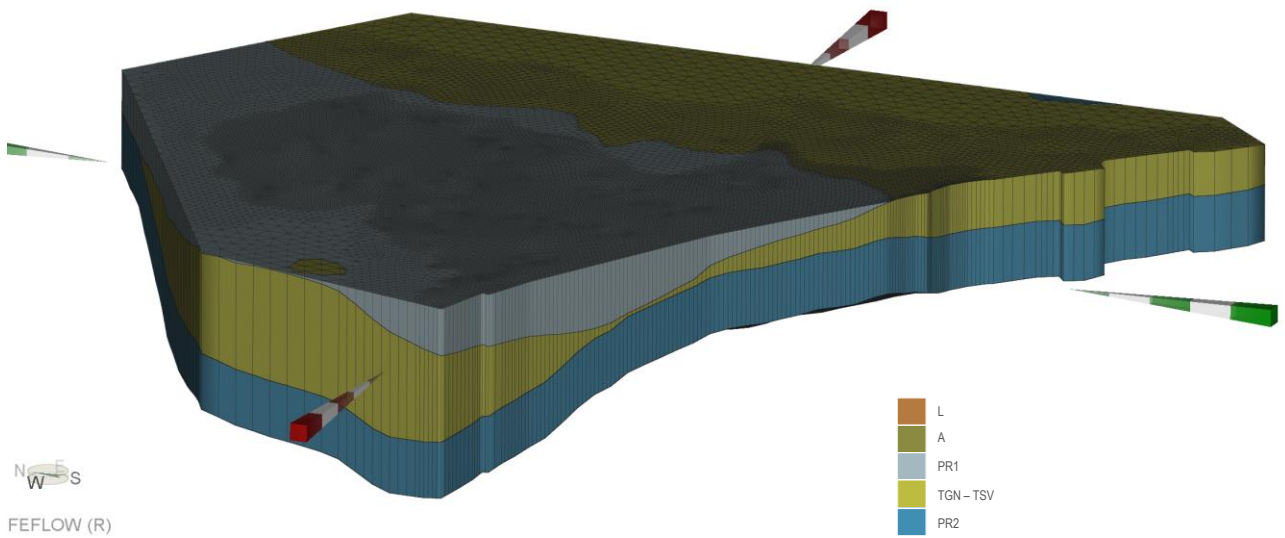


Figura 55 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -15 metri s.l.m).

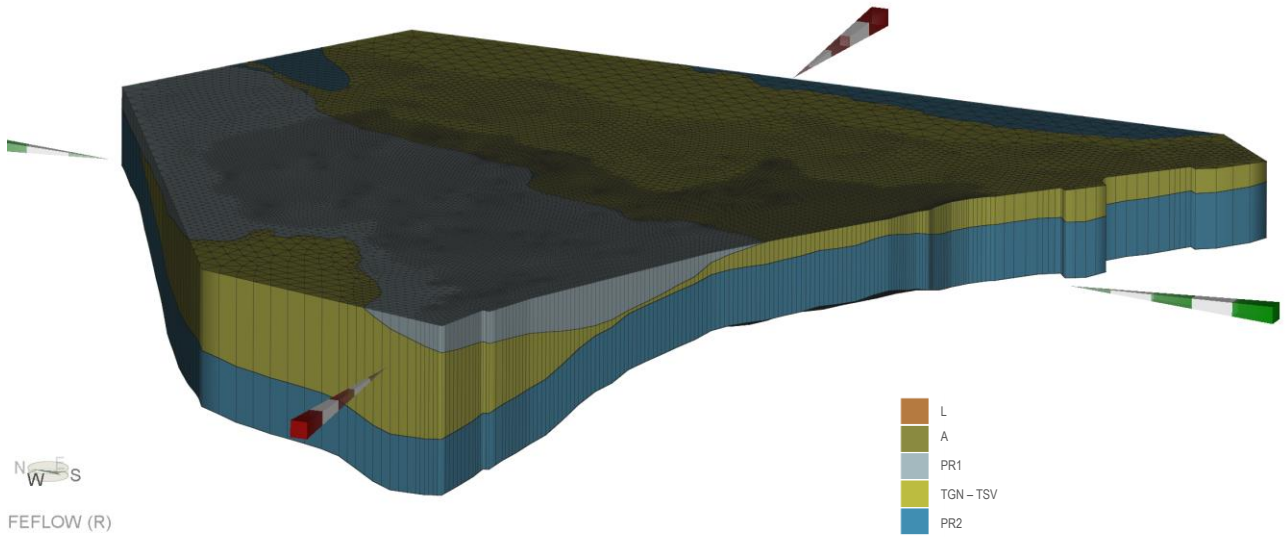


Figura 56 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -20 metri s.l.m).

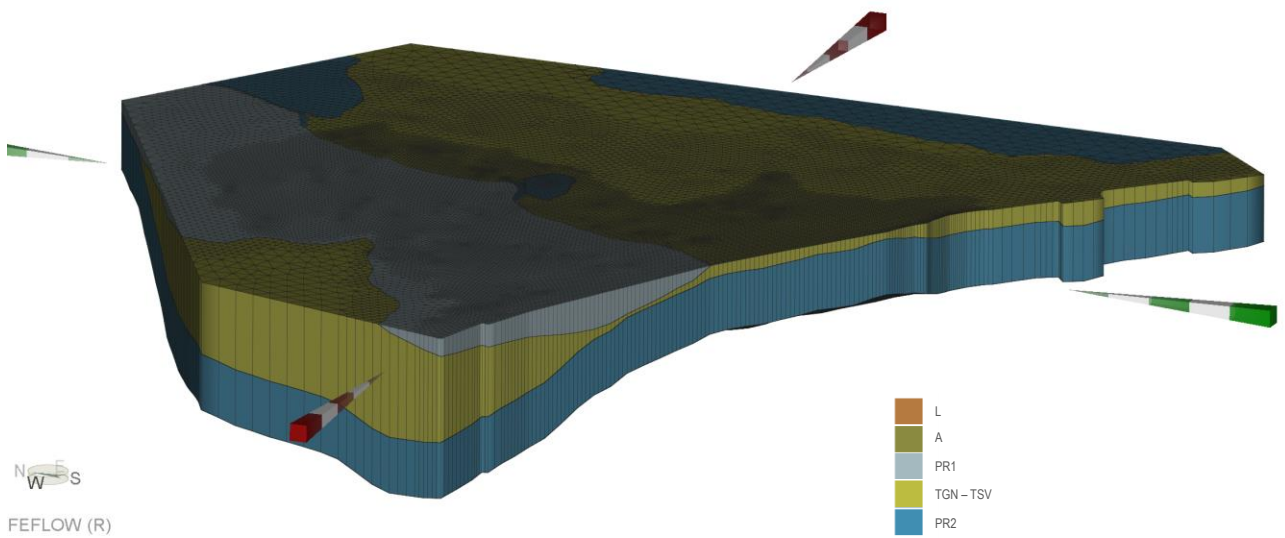


Figura 57 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -25 metri s.l.m).

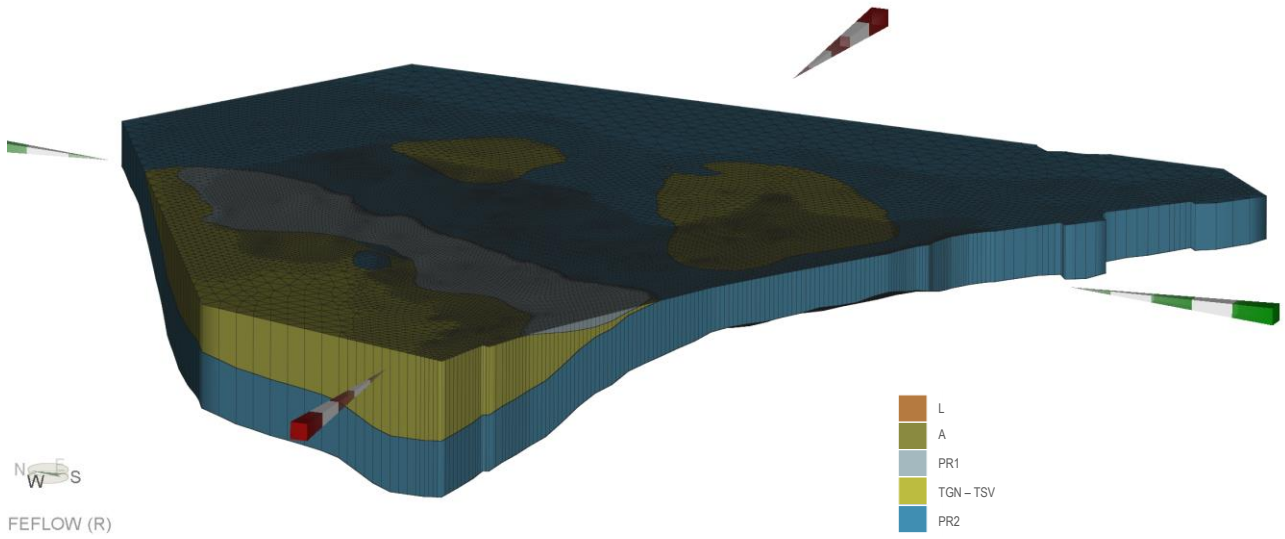


Figura 58 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -30 metri s.l.m).

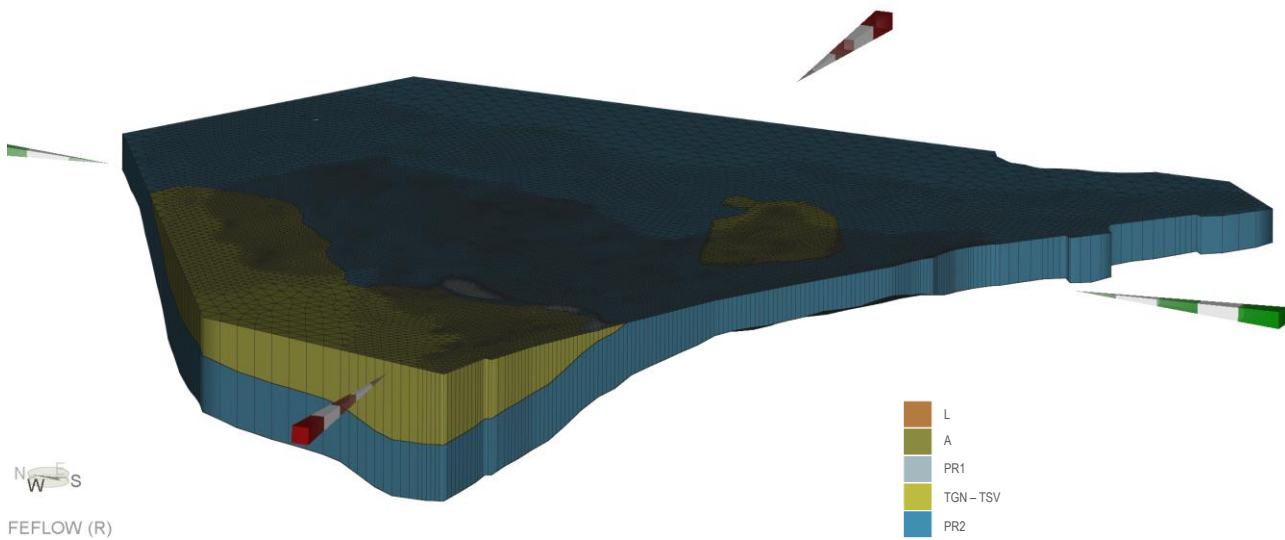


Figura 59 - Sezione sub-orizzontale del modello geologico 3D (quota -35 metri s.l.m).

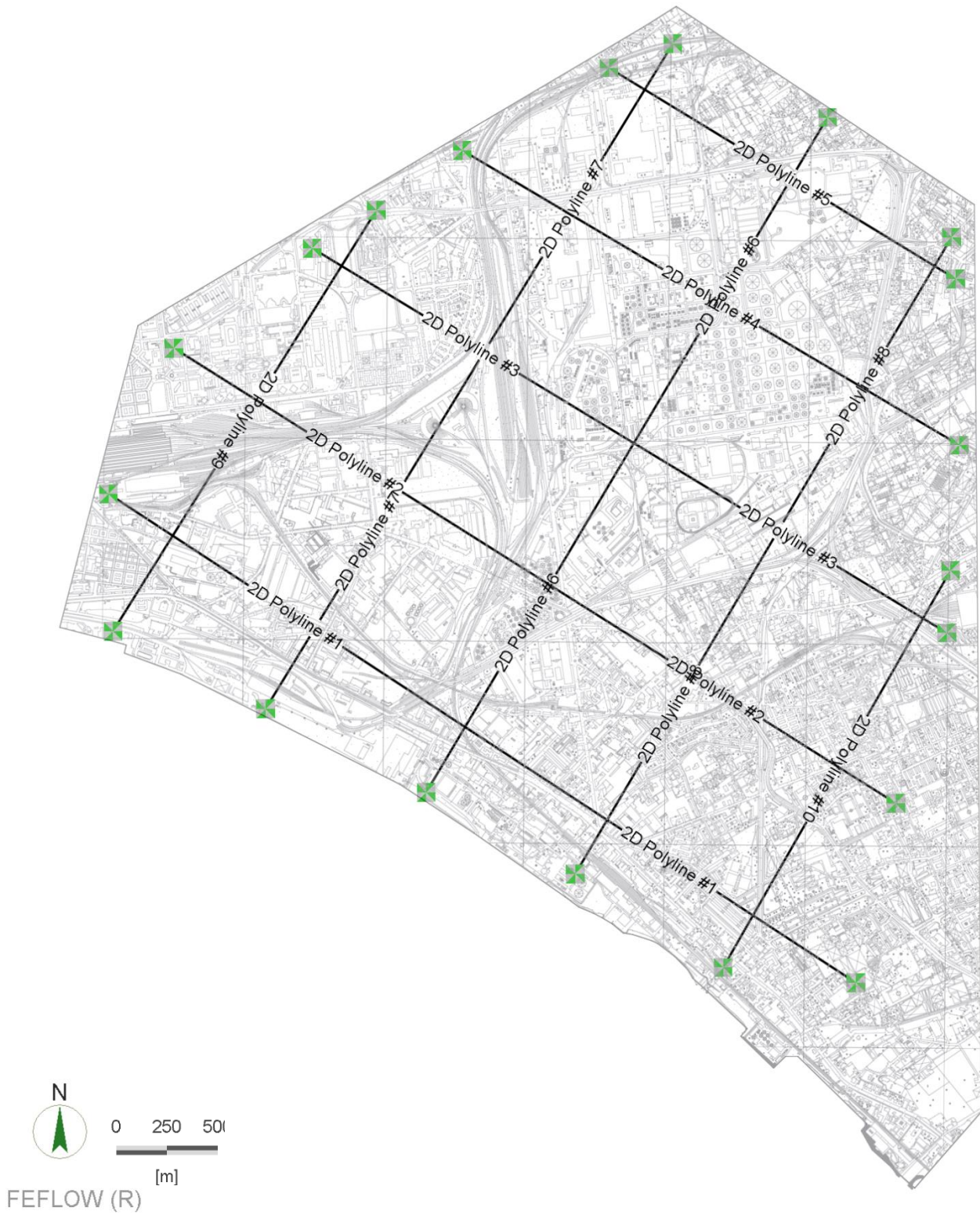


Figura 60 - Tracce di sezione.

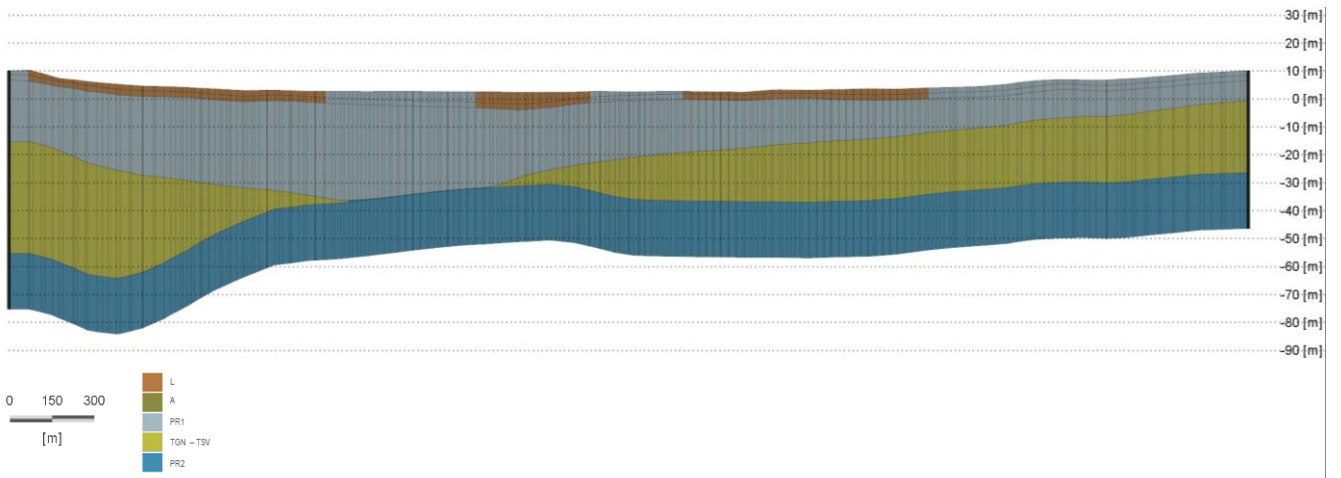


Figura 61 - Sezione n°1.

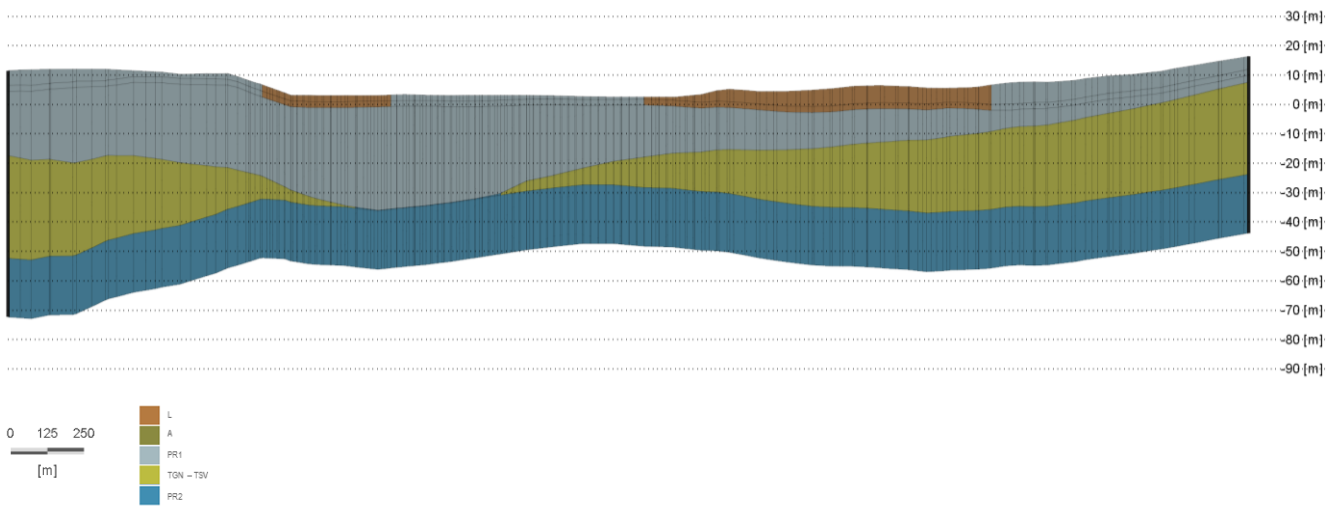


Figura 62 - Sezione n°2.

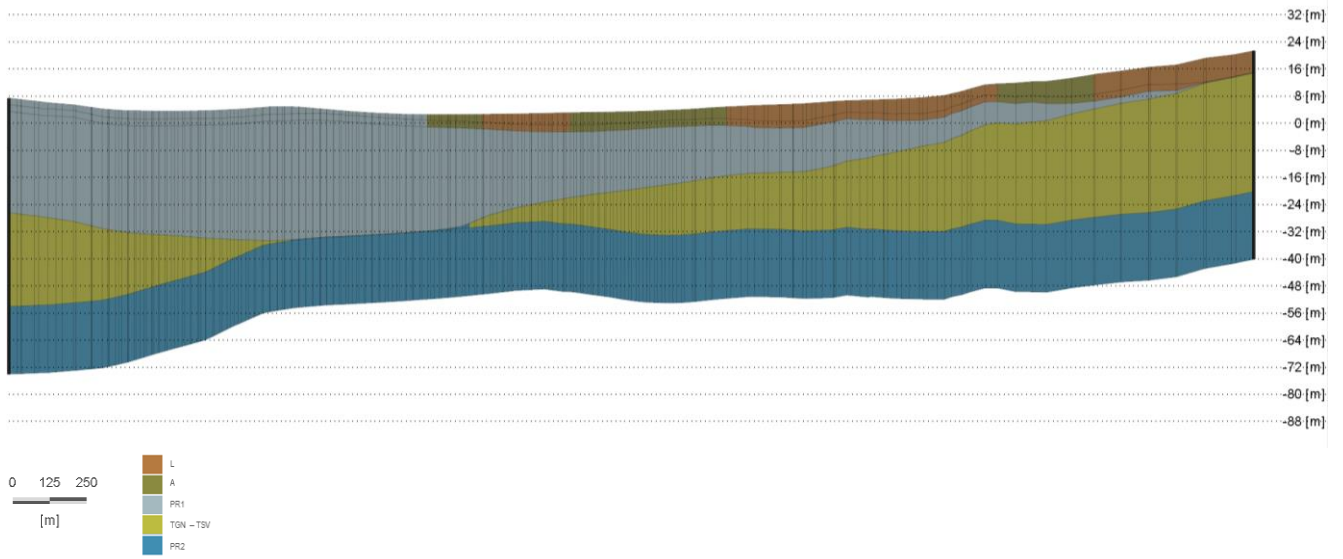


Figura 63 - Sezione n°3.

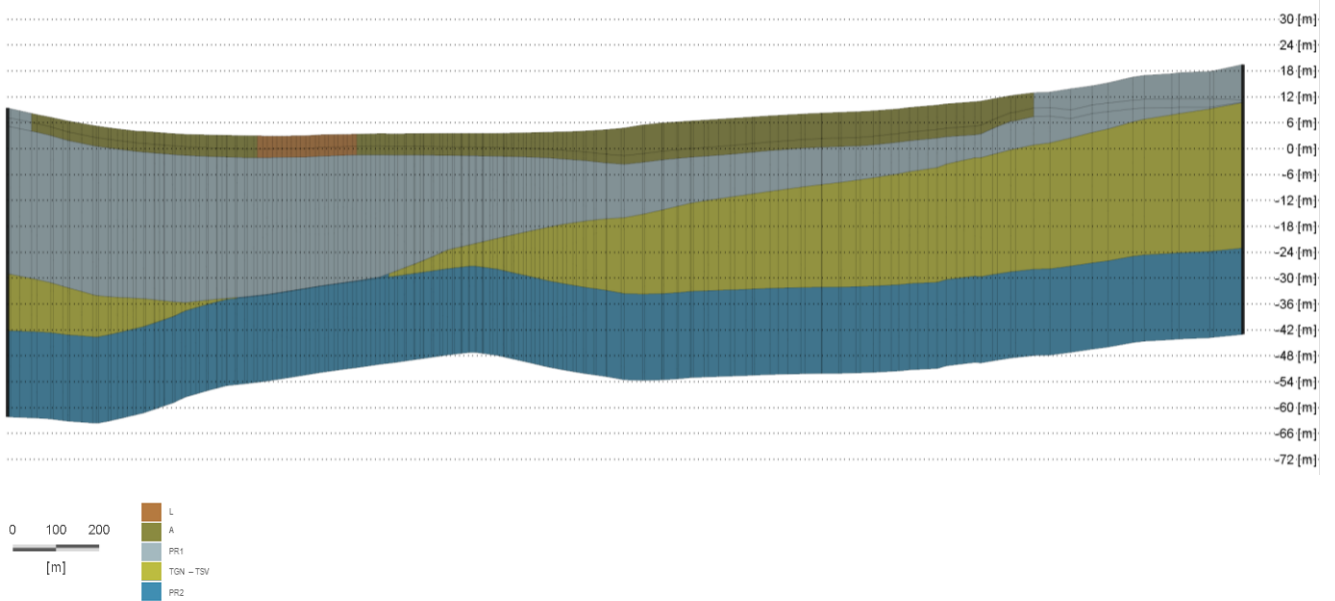


Figura 64 - Sezione n°4.

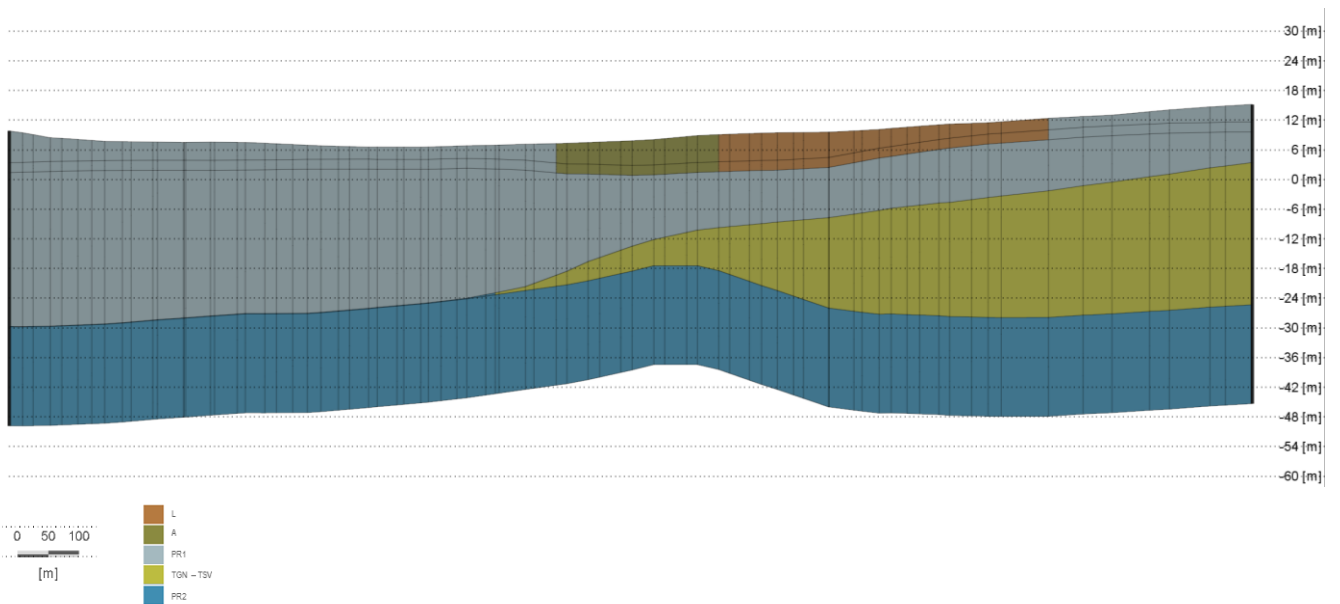


Figura 65 - Sezione n°5.

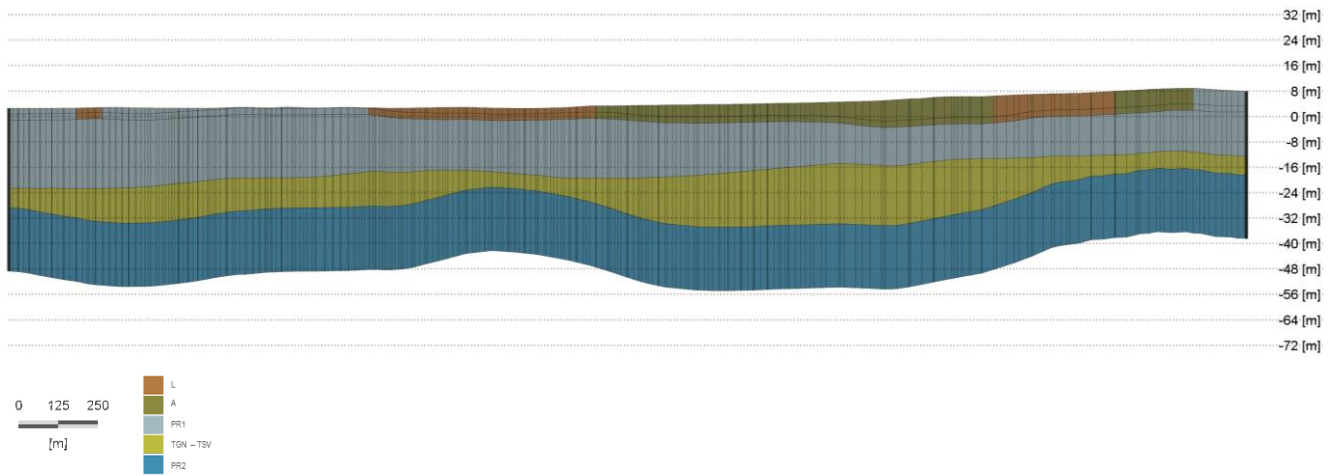


Figura 66 - Sezione n°6.

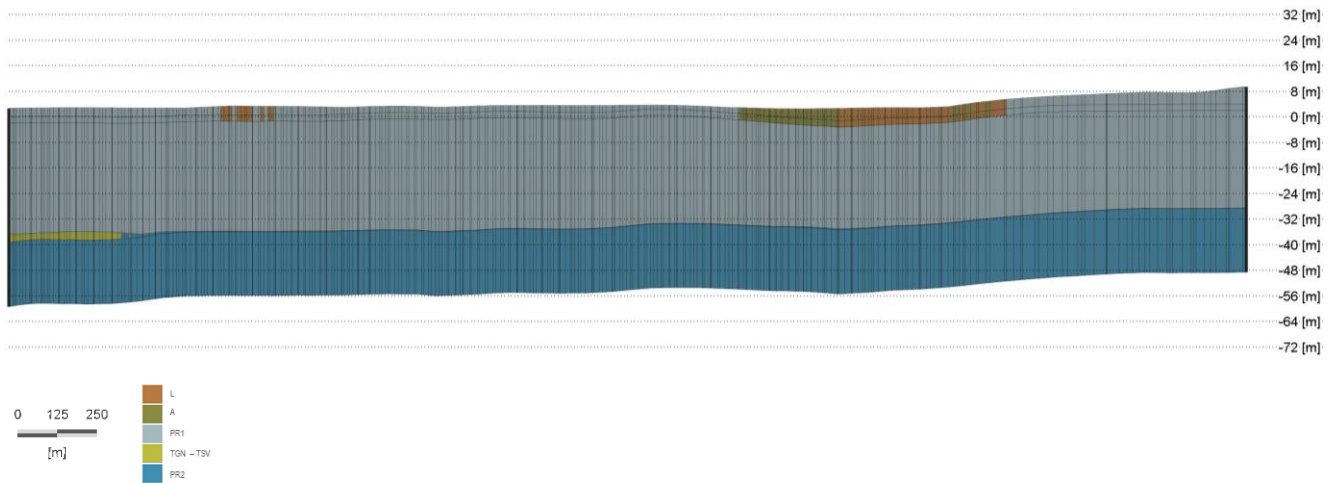


Figura 67 - Sezione n°7.

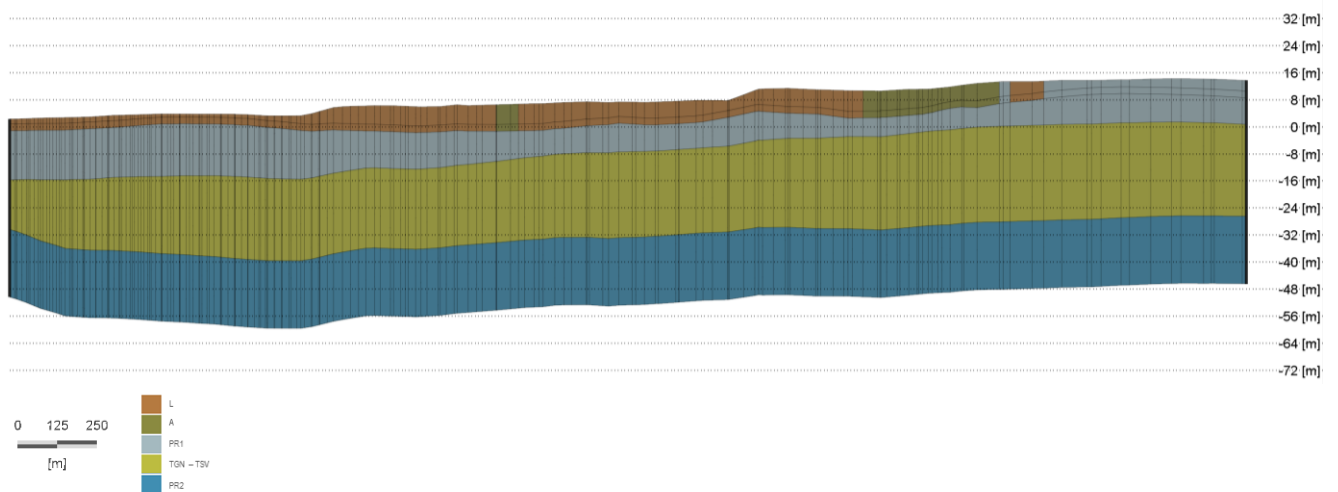


Figura 68 - Sezione n°8.

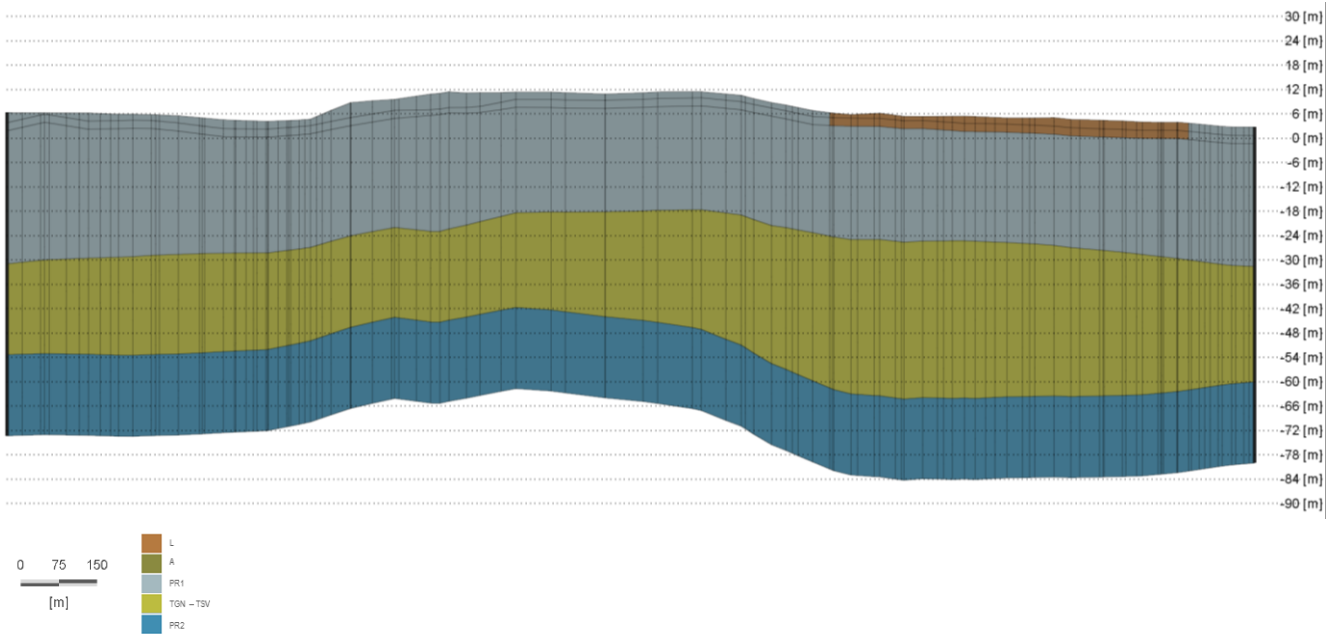


Figura 69 - Sezione n°9.

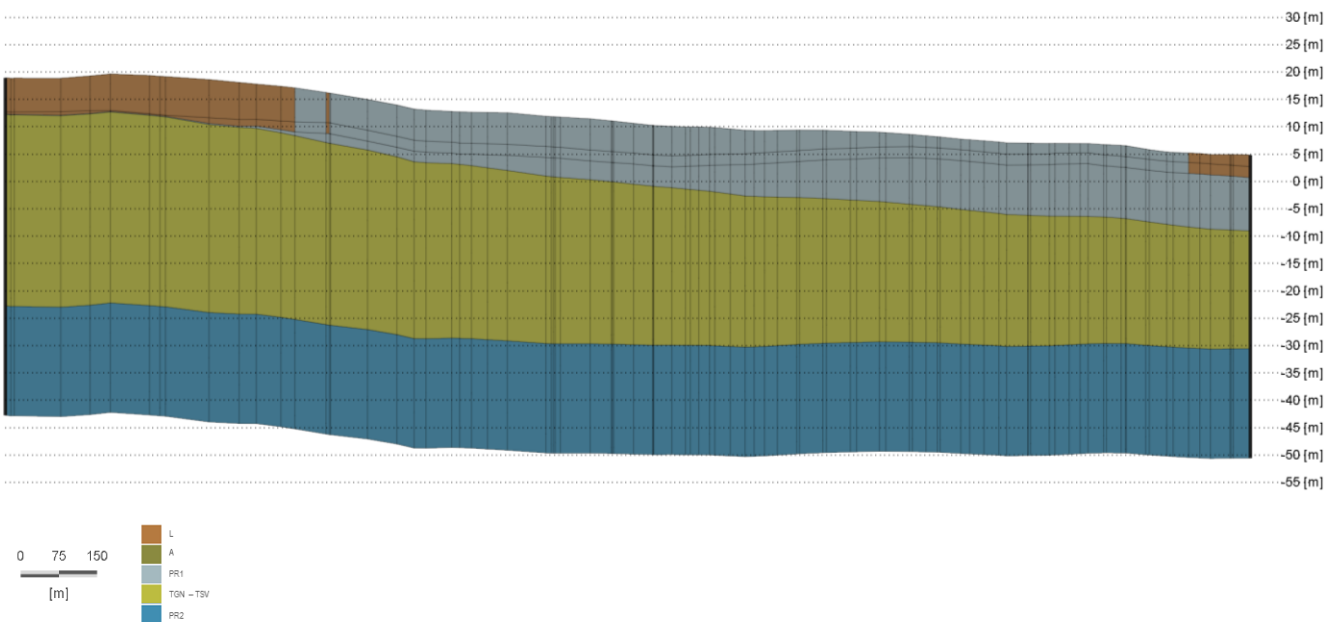


Figura 70 - Sezione n°10.

3.2.3 Condizioni al contorno

Sono state specificate le condizioni al contorno del modello, che rappresentano le assunzioni matematiche ai confini del dominio che specificano la variabile dipendente (il carico idraulico) o la sua derivata spaziale (gradiente idraulico) lungo i limiti del dominio di calcolo. Nel modello sono state dunque implementate le seguenti condizioni al contorno così rappresentate matematicamente come schematizzato e raffigurate in Figura 71 e Figura 72.

Nel dettaglio si distinguono le seguenti condizioni al contorno (BC):

- Limiti a potenziale imposto – Constant Head BC (condizioni di Dirichlet - I° tipo):
- identifica i limiti ad altezza piezometrica specificata, questo è stato utilizzato per stimare l'influenza di un limite forte, il cui livello si mantiene in pratica inalterato per il periodo di tempo modellato. Per quanto il modello è stata attribuita un'unica condizione al contorno esterna, ovvero quella di carico 0 m s.l.m. lungo la linea di costa, corrispondente al recapito verso mare della falda superficiale, e quella di carichi idraulici costanti lungo i limiti NE, SE e NW. I valori di carico assegnati sono stati dedotti a partire dalle ricostruzioni piezometriche, in particolare lungo il limite marino è stato assegnato il carico idraulico nullo, mentre lungo gli altri margini sono stati assegnati valori di 9, 8 e 7 metri s.l.m. In particolare il carico costante di 0 metri s.l.m. del limite marino è stato assegnato ai nodi dei primi 4 layers, ovvero sino alla quota massima di -50 metri s.l.m, poiché si ipotizza che in condizioni di equilibrio questa quota rappresenti il limite di interfaccia tra acque dolci e salate, quindi con una sezione utile di deflusso compresa tra 0 e -50 metri s.l.m. I valori attribuiti ai modelli in stazionario sono stati oggetto di analisi di sensitività in fase di calibrazione.

H = 0 m s.l.m. lungo la linea di costa, margine SW.

H = 8 m s.l.m. lungo il margine NE.

H = 9 m s.l.m. lungo il margine SE.

H = 6 m s.l.m. lungo il NW.

- nessuna condizione al contorno (flusso nullo in/out) lungo la porzione terminale del margine NW e quello SE al congiungimento con la linea di costa, corrispondente al limite del dominio in cui le piezometrie ricostruite risultano ortogonali alla linea di costa e quindi senza flussi in ingresso o in uscita dal dominio di calcolo in condizioni stazionarie.

Sono state inoltre applicate le seguenti condizioni interne:

- Limiti a flusso imposto – Constant Flow BC (condizioni di Neumann - II° tipo): identifica limiti a flusso imposto, per i quali la derivata dell'altezza piezometrica attraverso il limite è specificata. Tale condizione è stata utilizzata per implementare la ricarica per infiltrazione diretta da precipitazioni dalla superficie topografica. L'infiltrazione efficace è stata necessariamente attribuita all'intera superficie del modello. Si è proceduto ad assegnare due diverse aliquote di infiltrazione per le aree scoperte e per quelle cementate secondo quanto

stimato in fase di analisi del bilancio idrogeologico. Nella ricarica per infiltrazione è stata aggiunta un'aliquota derivante dalle perdite acquedottistiche in maniera diffusa, che può risultare poco verosimile alla scala locale, deriva dalla non conoscenza in dettaglio la geometria della rete dell'acquedotto e degli scarichi al suolo o nel sottosuolo dalle aree pavimentate. Questo valore di ricarica è stato sommato a quello di 10 l/s stimato nel bilancio e derivato in fase di calibrazione. La stessa condizione è stata utilizzata per simulare i prelievi dai pozzi industriali e di bonifica dell'area secondo le stime di portata giornaliera derivate per i singoli pozzi a disposizione. Per quanto riguarda i pozzi ad uso privato ed industriale sono poche e sporadiche le informazioni utili all'implementazione del modello, si conoscono le ubicazioni dei principali pozzi ad uso industriale in funzione, mentre la rete di pozzi privati impiegati per scopi non strettamente collegati alle attività produttive sfuggono alle conoscenze degli stessi Enti locali. Di contro si hanno informazioni precise sulle caratteristiche di funzionamento dei pozzi di bonifica, riportati nel modello, sono descritti nel paragrafo 4.1. e rappresentate in Figura 30.

- Limiti a flusso dipendente dal carico - Flow transfer BC (condizione di Cauchy – III° tipo): identifica limiti di tipo misto (o semipermeabile) in cui il flusso è calcolato una volta fissato un valore di carico idraulico al contorno ed in funzione di un fattore di ritardo nel flusso (fuga). Questa è utilizzata per rappresentare flusso a carico dipendente, scambi idrici tra elementi di superficie e la falda. Nel caso in esame è stato utilizzato il limite per simulare l'effetto di drenaggio esercitato dalla vecchia rete di canali di bonifica interrati lungo la depressione del Sebeto-Volla, nel settore centrale del SIN. Tale condizione è stata attribuita al modello in quanto la stessa piezometria evidenzia una linea di drenaggio marcata proprio in prossimità del principale linea di canalizzazione che ripercorre il tracciato del paleoalveo del Fiume Sebeto, oggi completamente trasformato in un collettore detto dello Sperone, e lungo il Fosso Reale e il Canale Corsea. La condizione permetterà di poter verificare in fase di calibrazione l'entità dei drenaggi possibili delle acque di falda verso le vecchie canalizzazioni, che seppur oramai chiuse e sostituite con collettori, potrebbero offrire ancora vie preferenziali di deflusso e drenaggio al margine delle vecchie strutture. La condizione è stata simulata imponendo quindi una situazione di leakage verso i vecchi tracciati dei canali. Il limite si esercita attribuendo il valore di quota di esercizio del corpo idrico drenante, ovvero di abbattimento del carico idraulico fissato alla quota afferente la base del canale (quota di estrazione) ed un valore di "bedload resistance" associata alla specifica condizione al contorno compresa tra 5 a 10 giorni⁻¹, che in fase di calibrazione ha consentito di stimare il leakage del potenziale dreno in funzione della piezometria sperimentale.

Per ovviare alle limitazioni di informazioni riguardo al drenaggio e a quello degli emungimenti privati diffusi si è proceduto alla definizione di un "constrain" al modello di "massimo piezometrico", ovvero si è stabilito che il carico idraulico sia sempre al di sotto superficie topografica. Questo limite permette di ragguagliare l'assetto piezometrico nelle aree in cui, per

assenza di condizioni al contorno specifiche, vi sarebbero delle risorgive delle acque di falda non rilevate, e di adeguare il bilancio di massa del sistema di flusso.

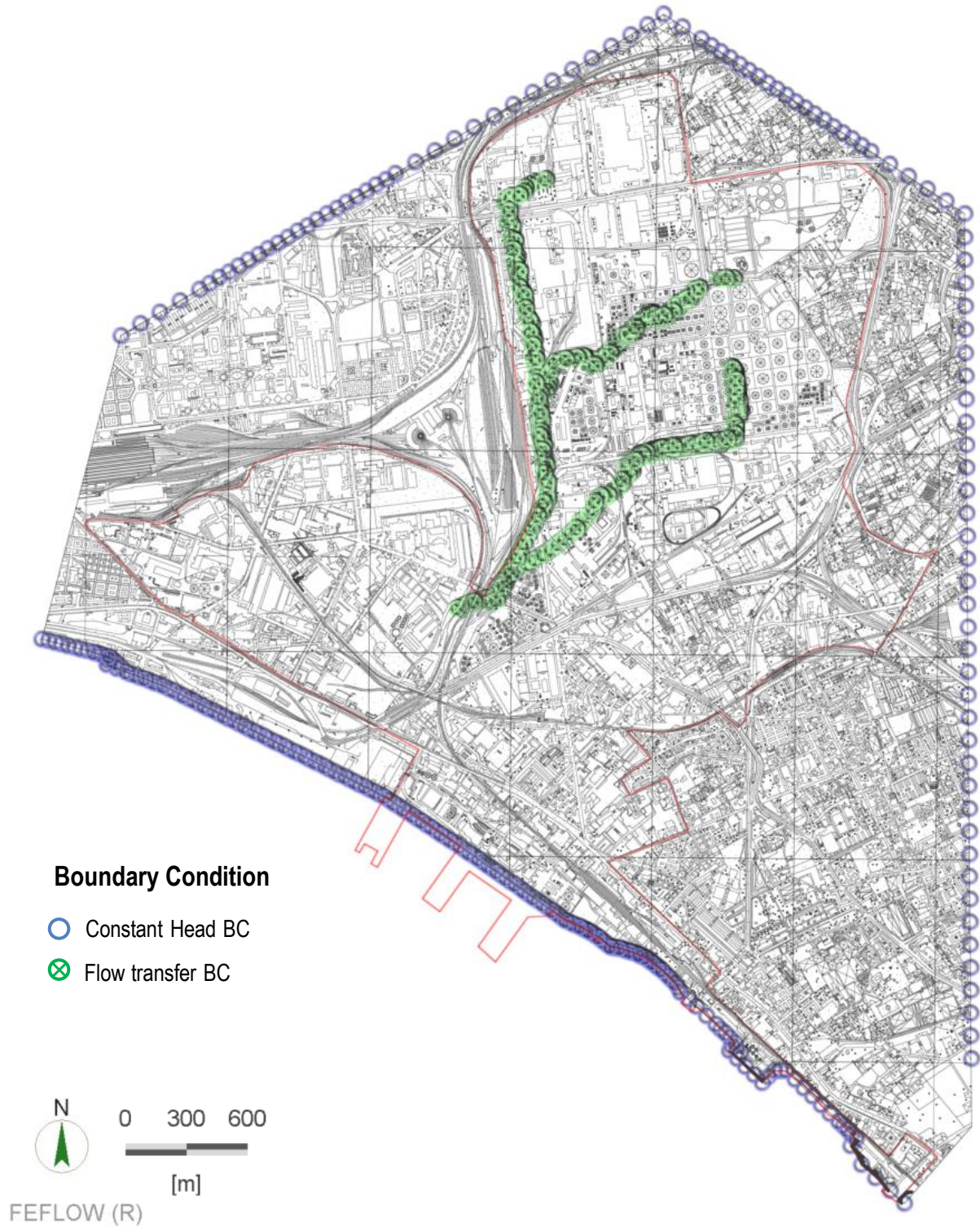


Figura 71 - Condizioni al contorno del modello di flusso: Constant Head; Flow Transfer.

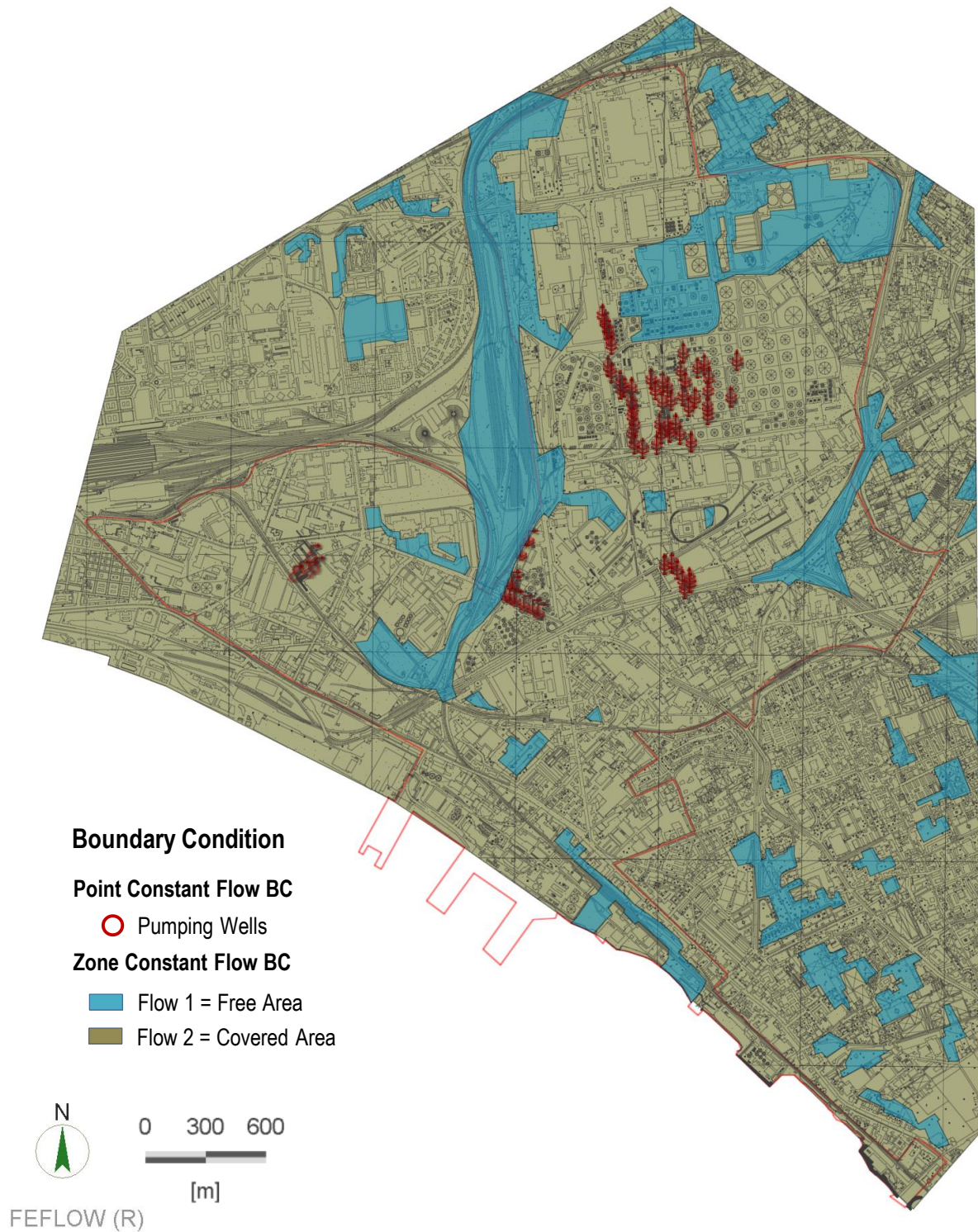


Figura 72 - Condizioni al contorno del modello di flusso: Constant Flow.

3.2.4 Parametrizzazione idrodinamica

La conducibilità idraulica dei materiali acquiferi è stata attribuita sulla base della sintesi dei dati sperimentali (prove di emungimento, Lefranc, Slug test) di cui al precedente paragrafo 2.6.4. Sono stati assegnati e variati in fase di calibrazione valori di K compresi tra un massimo di 1×10^{-4} m/s e un minimo di 1×10^{-4} m/s per i depositi acquiferi piroclastiti inferiori e superiori (PR2 e PR1). Per i depositi acquitardi limoso argillosi alluvionali (A) il range di esistenza della permeabilità è compresa tra 1×10^{-7} m/s e 1×10^{-6} m/s, mentre i Tufi sono stati attribuiti valori massimi di 1×10^{-5} m/s e minimi di 1×10^{-9} m/s (TSV e TGN). Le lave Vesuviane e del Somma (LS e LV) stratificate tra tufi e piroclastiti sono stati assimilati a corpi con permeabilità vicine alle piroclastiti e quindi non rappresentate come unità separate e assimilabili dal punto di vista idrodinamico ad un'unica unità acquifera.

Per ogni cella sono stati assegnati valori medi di K_x e K_y , con una anisotropia verticale $K_z = 0.1 * K_{xy}$, ciò per tenere conto della riduzione di conducibilità idraulica nella direzione di sedimentazione. I valori assegnati sono stati poi variati in fase di calibrazione all'interno del range di esistenza di ogni singola categoria litologica. In fase di calibrazione sono stati ottimizzati ed assegnati i seguenti i valori medi di K , variabili all'interno del campo di esistenza di ogni singola unità:

- Alluvioni (A) = Limi argillosi 5×10^{-7} m/s, Sabbie limose 1×10^{-5} m/s;
- Piroclastiti superiori (PR1) = 4×10^{-4} m/s;
- Piroclastiti inferiori (PR2) = 6×10^{-4} m/s;
- Tufo Giallo Napoletano e Tufi Vesuviani (TGN e TSV) = 1×10^{-7} m/s.

Contestualmente alle stesse zone litologiche sono stati assegnati valori di porosità efficace: $A=0.05$, PR1 e PR2=0.2, TGN e TSV=0.1; coefficiente di immagazzinamento (S_s) di 1×10^{-5} 1/m e potenzialità specifica (S_y) uguale alla porosità efficace.

In fase di simulazione sono stati assegnati i valori di parametrizzazione idrodinamica appena descritti e fatti variare all'interno di un range di valori possibili compresi tra il massimo e minimo riscontrato per ogni singola unità idrogeologica in fase di misura in sito.

3.3 Simulazioni di flusso e calibrazione del modello

In questa fase si è verificata la capacità del modello numerico di riprodurre il sistema idrogeologico e pertanto la sua applicabilità a fini predittivi. La procedura di calibrazione è stata condotta seguendo gli standard di qualità ASTM D5981 - 96(2008) *Standard Guide for Calibrating a Groundwater Flow Model Application*. Il modello di flusso è stato calibrato in condizioni stazionarie sulla base della piezometria di riferimento di Figura 25. Per definire il target di calibrazione occorre considerare come la piezometria di riferimento derivi dalla omogeneizzazione di dati di sintesi derivate dal monitoraggio SOGESID 2012 e da differenti aziende del SIN in ambito dei Piani della Caratterizzazione.

Il target di calibrazione del modello, non può pertanto essere costituito, come di norma, da un valore preciso e univoco della differenza di carico in specifici punti di controllo. La calibrazione si è pertanto basata principalmente sulla ricerca di congruenza nel campo di moto tra piezometria simulata e sperimentale, ovvero sulla complessiva coerenza di:

- morfologia della superficie piezometrica (assi drenanti, spartiacque sotterranei, ecc.);
- gradienti idraulici locali;
- direzioni di flusso.

Nella fase di calibrazione, i valori simulati (altezze piezometriche) sono state confrontati con i valori realmente osservati nel monitoraggio 2012 integrati con i dati “omogenei” riferibili al periodo di morbida acquisiti dalle aree private dal 2004 sino al 2014. I dati in ingresso al modello (parametri e condizioni al contorno) sono stati modificati, all’interno del campo di variazione stabilito, fino a quando i valori calcolati non hanno collimato con quelli osservati al netto di una tolleranza predefinita. Questo processo è stato effettuato manualmente (*trial and error adjustment*). La validazione del modello è raggiunta quando i diversi scenari del flusso sono riprodotti dal modello senza variare le caratteristiche fondamentali dello stesso.

L’acceptabilità della calibrazione è stata valutata per mezzo di un grafico della distribuzione dei valori calcolati rispetto a quelli misurati. Le differenze tra questi valori sono state dapprima calcolate in 318 punti di osservazione. Per il raggiungimento degli obiettivi di calibrazione sono stati analizzati gli statistici di calibrazione della funzione dei residui:

- residui di calibrazione (R, calibration residual),
- errore medio assoluto (ARM, absolute residual mean),
- radice della somma dei quadrati residui (RMSE, root mean square error),
- errore standard delle stime (SEE, standard error of estimate),
- errore standard normalizzato (NRMSE %),
- coefficiente di correlazione (CC).

Nel lavoro saranno perseguiti gli obiettivi specifici di calibrazione come stabilito nelle linee guida del U.S. Geological Survey (Hill, 1998); in particolare il modello dovrà avere un valore di NRMS % ottimale inferiore al 10%, la media degli errori in valore assoluto (ARM) quanto più vicina allo zero, ed un coefficiente di correlazione prossimo ad 1. Nel caso specifico si ritiene sufficiente, ai fini degli obiettivi progettuali, assumere una tolleranza massima dei residui di 0.5 metri, ovvero inferiore alla variazione media stagionale del carico idraulico dell’area,

Il processo di calibrazione consiste nella variazione dei parametri più incerti entro un campo di variazione consistente con le ipotesi idrogeologiche iniziali. Per gli scopi di calibrazione si ipotizza che un qualsiasi residuo sia uguale alla media dei residui. Viene generato quindi un campo di variazione della media compreso entro un limite superiore ed uno inferiore, il quale fornisce un’indicazione dell’incertezza nella stima della media reale (Fetter C., 2001).

Più questo intervallo è stretto, più accurata è la stima. L'intervallo del 95% è quindi il campo di variazione entro il quale ci si aspetta che ricada il 95% dei punti calcolati. I carichi idraulici calcolati sono stati comparati con quelli misurati in un grafico a dispersione come riportato in Figura 78. La retta a 45 gradi rappresenta lo scenario di calibrazione perfetta, il caso in cui i carichi calcolati coincidano con quelli misurati.

L'obiettivo della calibrazione è verificare che la linea retta $y = x$ ricada all'interno dell'intervallo di confidenza del 95%. Il modello di flusso una volta eseguito ha permesso di stimare i principali termini che condizionano la soluzione, in particolare i valori di carico assegnato ai limiti del modello, i valori di ricarica oltre ai parametri del dreno e la conducibilità idraulica, seppur ragionati e consistenti con i dati di origine, meritano comunque un'analisi approfondita. La conducibilità idraulica del mezzo è sicuramente il parametro più sensibile e durante la fase di calibrazione i valori sono stati variati all'interno del range di esistenza delle singole zone.

La struttura del modello come descritta ai punti precedenti consente di operare per la calibrazione su un insieme di parametri specifici in regime stazionario riguarda la congruenza della piezometria in funzione del campo di:

- ricarica verticale (infiltrazione);
- conducibilità idraulica;
- prelievo dai pozzi;
- conduttanza e quota di estrazione dei potenziali dreni;
- carico costante ai limiti.

La piezometria calcolata al termine della calibrazione è riportata a livello d'insieme nella successiva Figura 80 relativa alla Slice 1, Figura 81 per la Slice 3 e Figura 82 per la Slice 5 (in proiezione su modello tridimensionale).

In fase di risoluzione al modello numerico, come specificato, è stato assegnato un "constrain" che impedisca al carico idraulico di oltrepassare la quota della superficie topografia con una tolleranza minima di 0.5 metri nelle aree di potenziale risorgiva. Tale condizione di calcolo si è resa necessaria per poter raggiungere un corretto bilancio di massa e per la calibrazione dei carichi idraulici osservati, in particolare nei settori più depressi, come l'area centrale del SIN afferente al paleoalveo del Sebeto, in cui l'assenza o l'insufficienza di condizioni al contorno di drenaggio delle acque sotterranee, possano impedire l'affioramento di acque di falda.

Il codice FEFLOW calcola quindi una piezometrica teorica sulla base di uno spessore di saturazione ("residual water depth") posto pari a 0.5 m minimo sulla superficie del layer della topografia, il flusso che si dovrebbe produrre in uscita dal sistema acquifero viene calcolato sul bilancio di massa, così da garantire la continuità del sistema di flusso. Le soluzioni numeriche sono state ottenute utilizzando il metodo di risoluzione dell'equazione matriciale ai Gradienti Coniugati (PCG - *Preconditioned Coniugate-Gradient Method*), con un valore del criterio di convergenza necessario a terminare il processo iterativo posto a 0.001 metri.

A livello complessivo, con riferimento al confronto tra il campo di moto calcolato e sperimentale (Figura 73), si rileva una congruenza degli elementi della morfologia piezometrica, ed in particolare:

- le perdite di carico localizzate in corrispondenza della depressione centrale del SIN in prossimità del vecchio reticolo dei canali di bonifica lungo il paleoalveo del Sebeto e nella porzione centro orientale del SIN nelle proprietà Q8 e Esso per effetto dei prelievi localizzati;
- l'asse di drenaggio principale lungo la porzione centrale del SIN corrispondente all'area depressa del Sebeto;
- il flusso convergente in corrispondenza verso l'area centrale del SIN dal settore Flegreo a NW e Vesuviano a SE, topograficamente più elevati e con carico idraulico maggiore.

Per il raggiungimento degli obiettivi di calibrazione sono stati analizzati gli statistici descrittivi di calibrazione della funzione dei residui. Lo studio ed il confronto tra le ricostruzioni piezometriche concettuali dedotte per interpolazione, con tutte le limitazioni specifiche di ogni algoritmo, come discusso ampiamente nella relazione, sono state utilizzate per fare solo un raffronto di tipo qualitativo, di contro la fase di calibrazione e verifica delle soluzioni del modello dal punto di vista quantitativo ha tenuto in considerazione solo il confronto dei carichi idraulici (osservati – calcolati).

Analizzando dunque lo scatter-plot dei carichi calcolati contro quelli osservati in Figura 78, dopo una accurata fase di calibrazione, è possibile costatare come l'insieme dei residui rientri all'interno del livello di confidenza ottimale del 95%, con un coefficiente di correlazione tra carichi osservati e calcolati pari allo 0,97. Per quanto riguarda il valore NRMS% è stato possibile raggiungere un valore minimo pari a 10.3%, errore standard (SEE) di 0.013 metri con un errore medio assoluto (ARM) di 0.39 metri, inferiore alla soggiacenza minima del livello piezometrico concettualizzato. Analizzando la distribuzione di frequenza dei residui è possibile riconoscere un andamento gaussiano con tendenza alla sovrastima del carico idraulico con un valore modale di frequenza compreso tra la classe 0.15 – 0.30 metri (

Figura 79).

L'ubicazione dei principali punti di errore è stata cartografata nelle mappe dei residui dei carichi idraulici misurati a confronto con a quelli calcolati nel layer 1, 2 e 3, rispettivamente riportate in Figura 75, Figura 76 e Figura 77. Nello specifico si riporta in Figura 73 il confronto qualitativo tra la superficie piezometrica ricostruita per interpolazione a partire dai dati di misura e quella simulata dal modello. Dall'analisi spaziale dei principali errori residui è possibile riscontrare come quelli che tendono a sovrastimare il carico idraulico misurato, per un valore superiore a 0.25 metri, sono concentrati ed allineati nella porzione riferibile alla canalizzazione del Sebeto nella sua parte più distale dalla linea di costa tra l'area "Q8 depositi Benit", lo stabilimento Q8 "KRC" e quello "Esso". In questo settore in passato il livello piezometrico era regolato dalla canalizzazione, (canale Corsea e il fosso Reale) i quali confluivano direttamente nel collettore dello Sperone (Sebeto) (Figura 74). Attualmente il principale elemento che influenza l'andamento piezometrico in questo

settore è la presenza dei numerosi pozzi di bonifica e secondariamente quelli industriali. La generale sovrastima dei carichi idraulici in questo settore sta ad indicare come l'effetto di emungimento abbia una maggiore intensità o la presenza di pozzi privati attivi di cui non si conosce il funzionamento, oppure d'altro canto può suggerire la presenza di condizioni locali di permeabilità inferiore a quella concettualizzata ed implementata nel modello proprio in tale settore. Ciò sarebbe plausibile ricordando come proprio in tale area siano presenti abbondanti depositi fini palustri, comunque riportati nel modello. Carichi idraulici simulati superiori a valori rilevati si registrano, invece, nelle porzioni est ed ovest del perimetro del SIN, mentre nella porzione centro orientale si evidenzia una tendenza ad una generale sottostima (Figura 74).

E' necessario ricordare che seppur profondamente alterati, tombati e non più visibili in superficie, il vecchio reticolo di canali, con particolare riferimento il canale Sbauzone (Fiume Sebeto), possa svolgere ancora un ruolo limitato di drenaggio delle acque di falda atto a stabilizzare e regolare i livelli piezometrici proprio nel settore più depresso della piana. Per quanto riguarda, invece, l'area dei depositi Q8, in questo settore la presenza di un'importante barriera idraulica attiva almeno dagli inizi degli anni 2000 produce un abbassamento della piezometria che si ripercuote anche nelle aree circostanti.

Altri punti isolati mostrano residui anomali, ovvero superiori a 0.50 metri sia in eccesso che in difetto. La loro collocazione al limite del perimetro del SIN e l'assenza di correlazione con altri punti di misura rende l'errore trascurabile in tali settori e non influenti nelle simulazioni previsionali successive. Riguardo agli standard di calibrazione, in relazione anche alla variazione assoluta della superficie piezometrica nel ciclo stagionale, si può ritenere soddisfacente la calibrazione e la parametrizzazione del modello di flusso in termini di conducibilità idraulica e flusso ai limiti. Il modello di flusso si può ritenere adeguato alla rappresentazione degli scambi idrici dell'acquifero e alla ricostruzione del campo di velocità medio nel periodo di morbida.

In un quadro di congruenza complessiva si riscontrano tuttavia differenze locali e residui superiori ed inferiori al limite di tolleranza di 0.5 metri, in cui il fitting non può essere migliorato se non introducendo nel modello elementi che pur non noti nel dettaglio, sono correlabili con chiarezza all'andamento della piezometria sperimentale. In fase di calibrazione non è stato possibile ridurre l'errore riducendo il carico piezometrico senza alterare fortemente il quadro generale. Per questi settori, ubicati principalmente al limite del perimetro del SIN con maggiore frequenza nel lato SE, come formulato in precedenza, non è stato possibile ricostruire la complessità geologica (alternanza di livelli locali a più alta e bassa permeabilità) e la presenza di eventuali condizioni al contorno per scarsità di dati (presenza di prelievi e captazioni locali) che determinano un residuo anomalo localmente in quanto il modello è carente di dati essendo esterni al SIN stesso. Quello che appare evidente è la condizione di parziale confinamento della falda profonda e gli scambi idrici tra i corpi idrici sotterranei. Sembrerebbe che, come già descritto nella fase di concettualizzazione generale del sistema idrogeologico dell'area nel paragrafo 2.5.2, gli spessori importanti e le caratteristiche di bassa permeabilità dei Tufi nei settore laterali del SIN vadano a creare un parziale confinamento della falda, tale condizione in fase di calibrazione è stata verificata ed è stato possibile ridurre gli

errori residui assumendo che in tale settore il carico idraulico misurato nei piezometri sia quello esistente nella porzione più profonda, associato dunque a quote delle slice 4, 5 e 6. Nelle aree centrali del SIN in cui il Tufo risulta assente, con spessori ridotti e in stato di alterazione, l'effetto di confinamento non è presente e i carichi idraulici sono riferiti ai livelli più superficiali (slice 1, 2 e 3).

Nell'Appendice al presente documento è possibile apprezzare la Tabella con il valore degli errori residui dei carichi idraulici osservati e calcolati e le slice di best fitting riferite ai punti esterni al SIN sono riferiti a porzioni più profonde dell'acquifero, di contro quelle dei punti al centro del SIN sono associate ai livelli più superficiali con un effetto di moto radiale convergente delle acque di falda lungo l'asse di drenaggio principale.

Un'altra condizione di cui è opportuno tener conto nell'interpretazione dei dati di calibrazione sono i livelli piezometrici misurati nei pozzi e piezometri più profondi. In questi punti le due falde, quella superficiale e quella profonda, potrebbero essere state messe in comunicazione favorendo gli scambi idrici dal basso verso l'alto con un aumentare del carico idraulico complessivo rilevato nei punti di misura. Questa ipotesi andrebbe a motivare gli errori residui più elevati della media, come una somma dei carichi idraulici delle falde sovrapposte.

La verifica degli effetti di semiconfinamento e del conseguente effetto di flusso idrico sotterraneo con componente di moto anche sub verticale è stato simulato dal modello ed è possibile apprezzarlo analizzando le sezioni idrogeologiche, in cui sono riportate le linee equipotenziali di carico idraulico, dalla Figura 83 alla Figura 89.

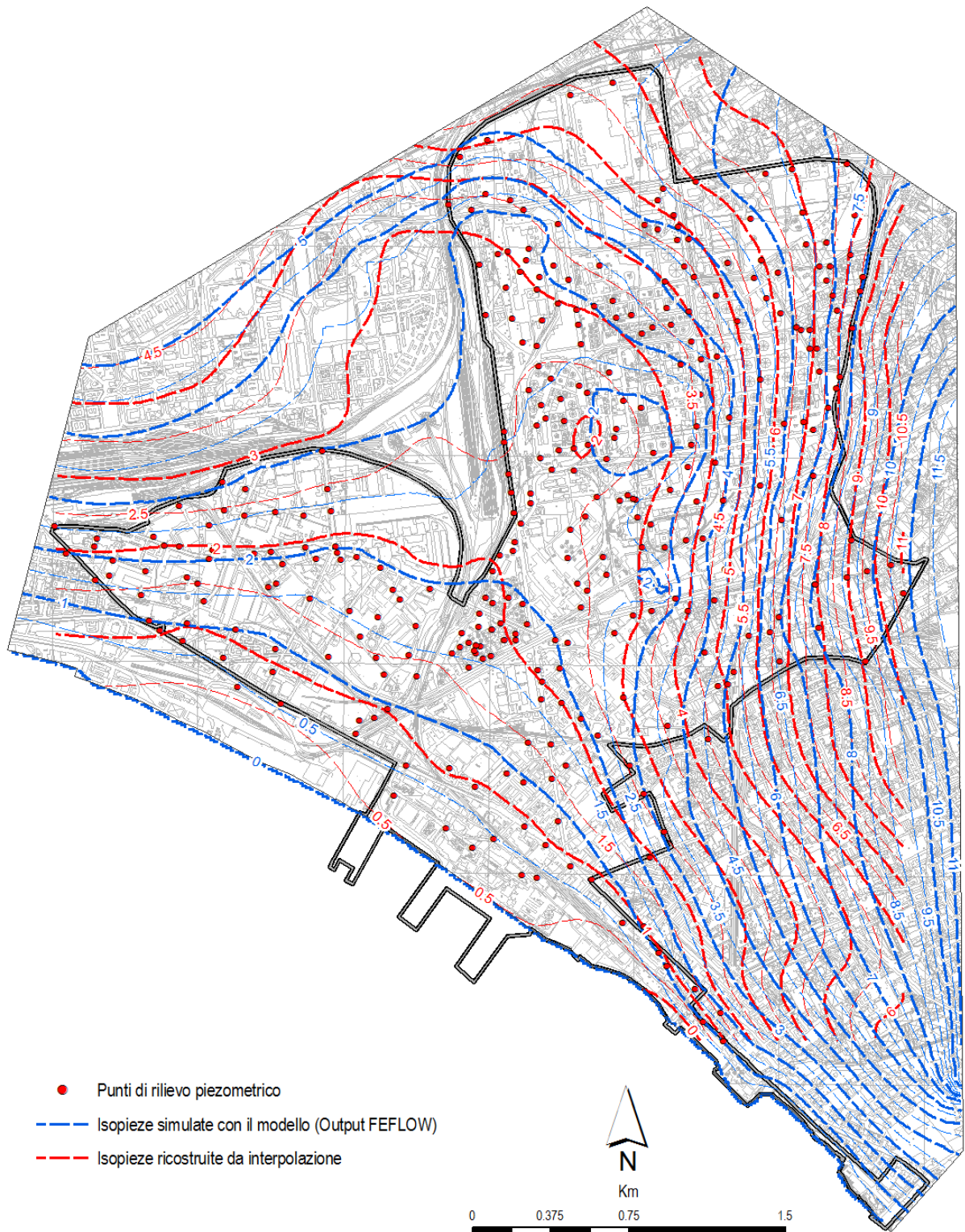


Figura 73 - Confronto tra la piezometria ricostruita per interpolazione e quella calcolata dal modello.

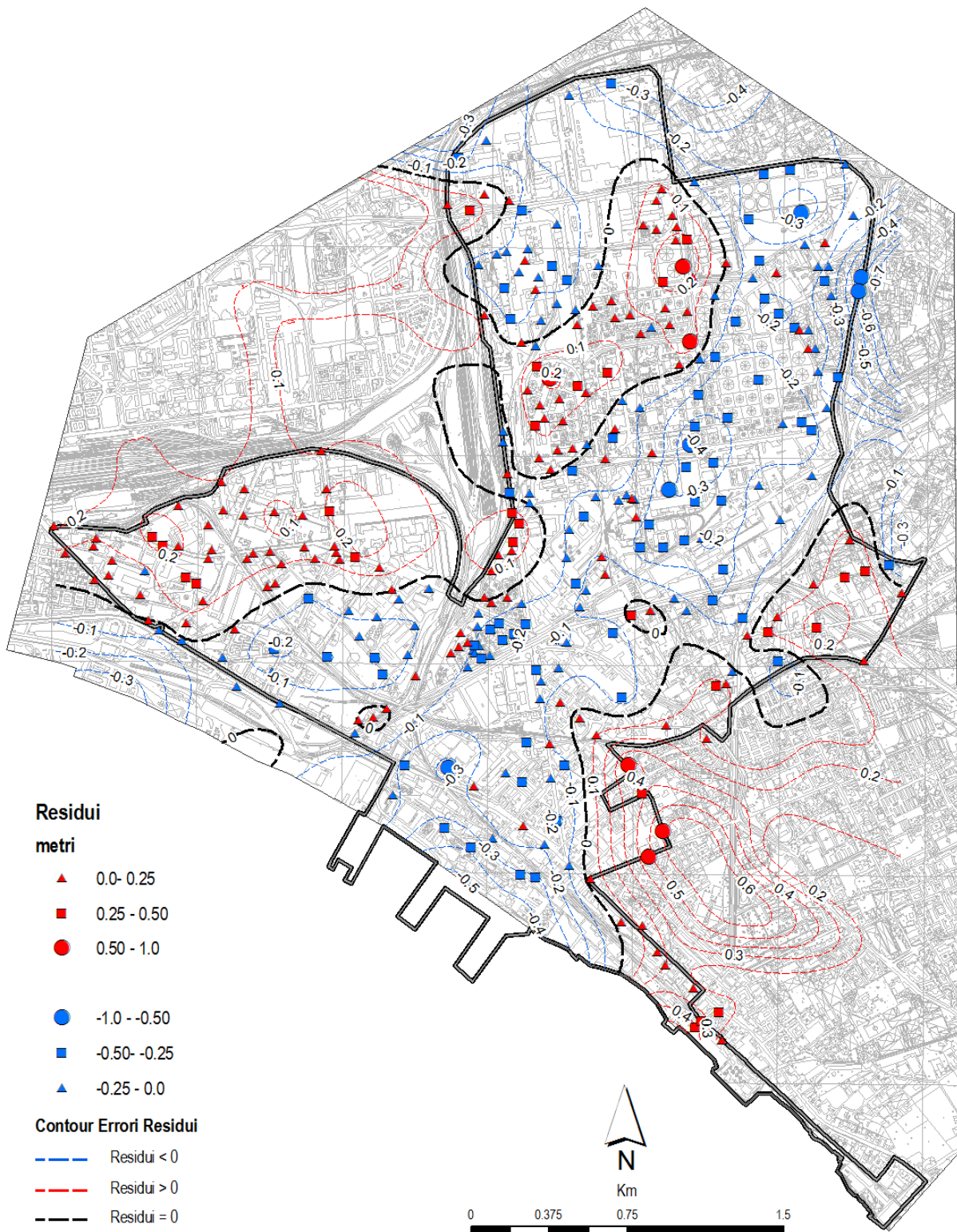


Figura 74 - Residui dei carichi idraulici osservati e calcolati.

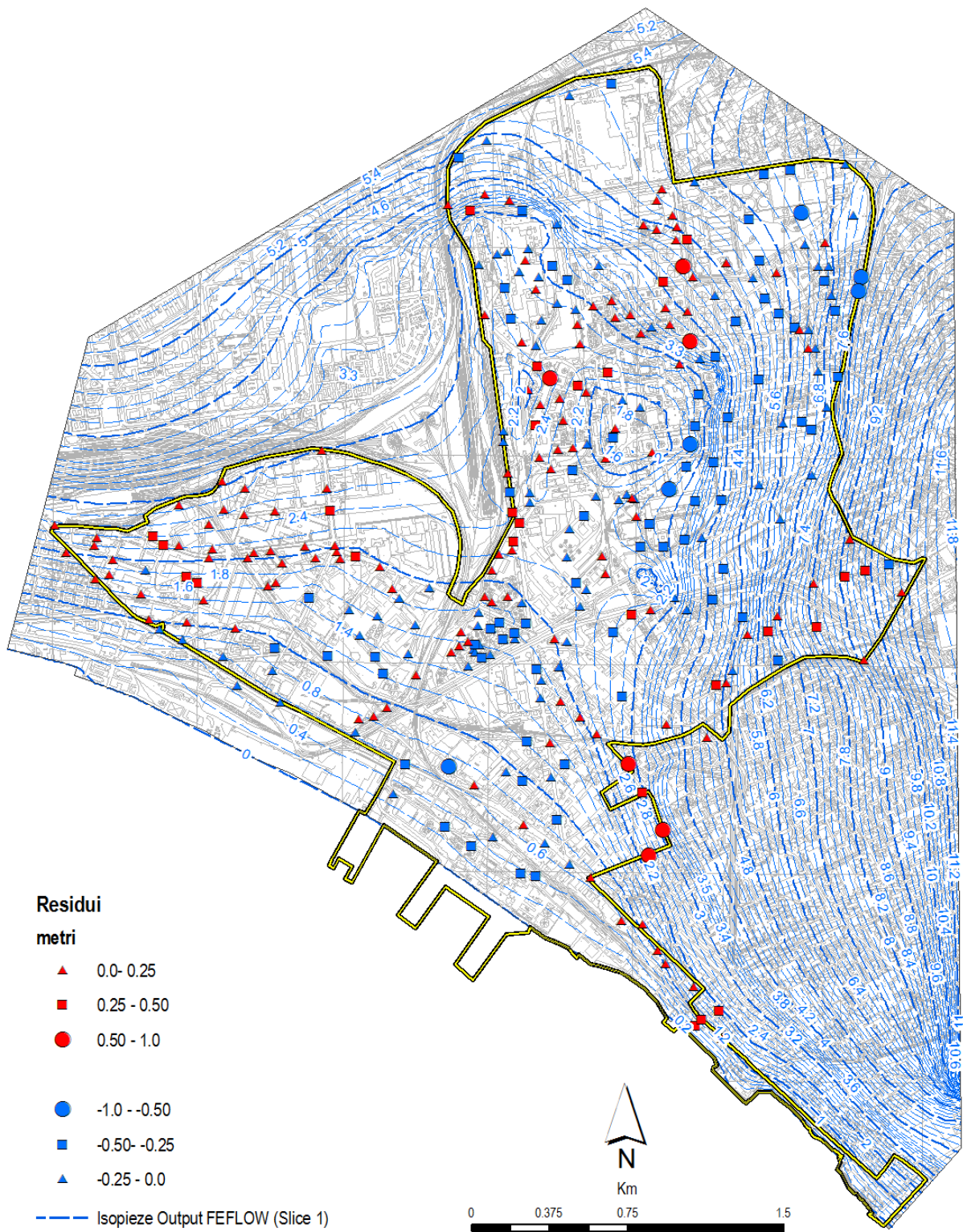


Figura 75 - Mappa dei residui dei carichi idraulici osservati e calcolati: layer 1 silce 1- 2.

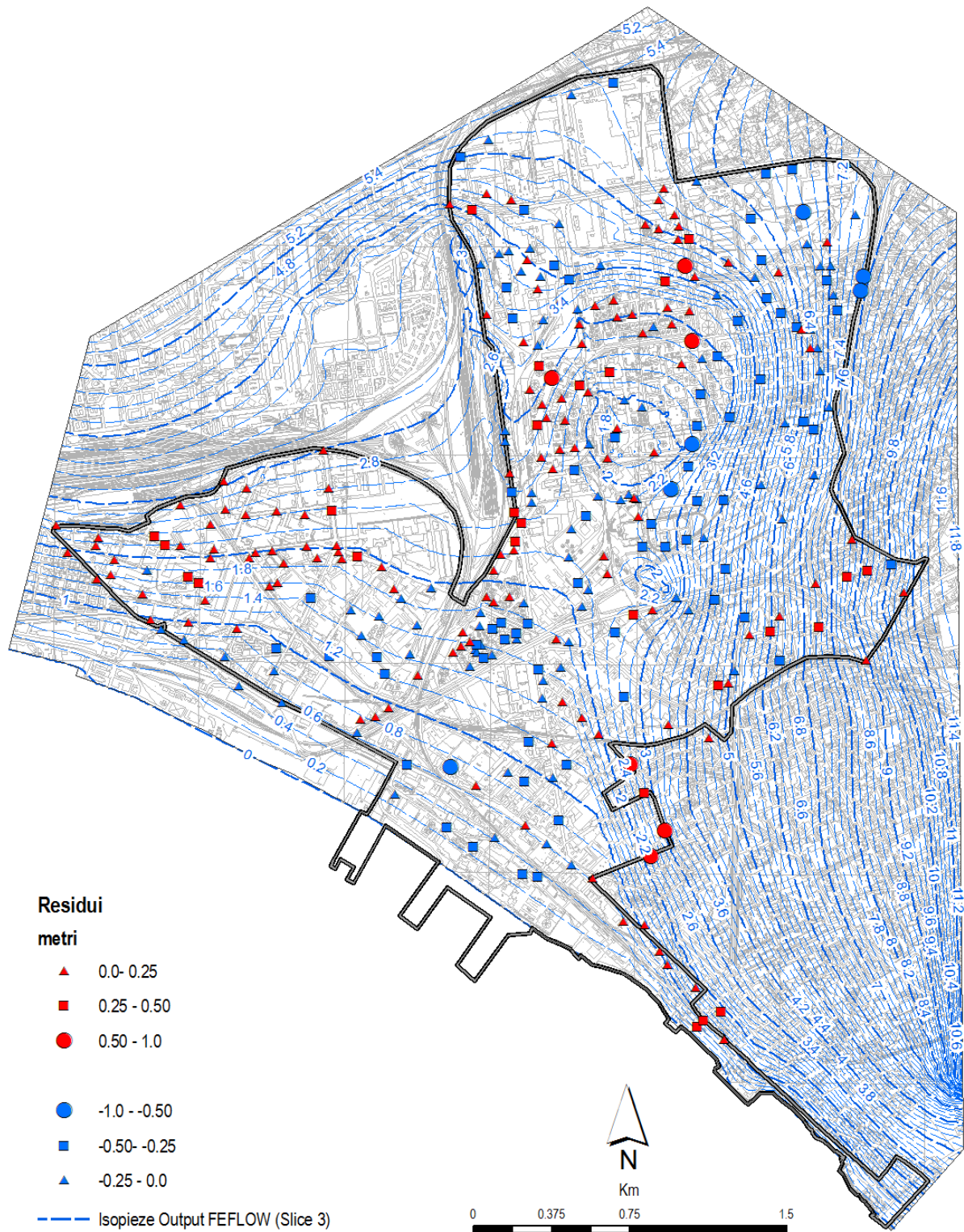


Figura 76 - Mappa dei residui dei carichi idraulici osservati e calcolati: layer 2 silce 3 - 4.

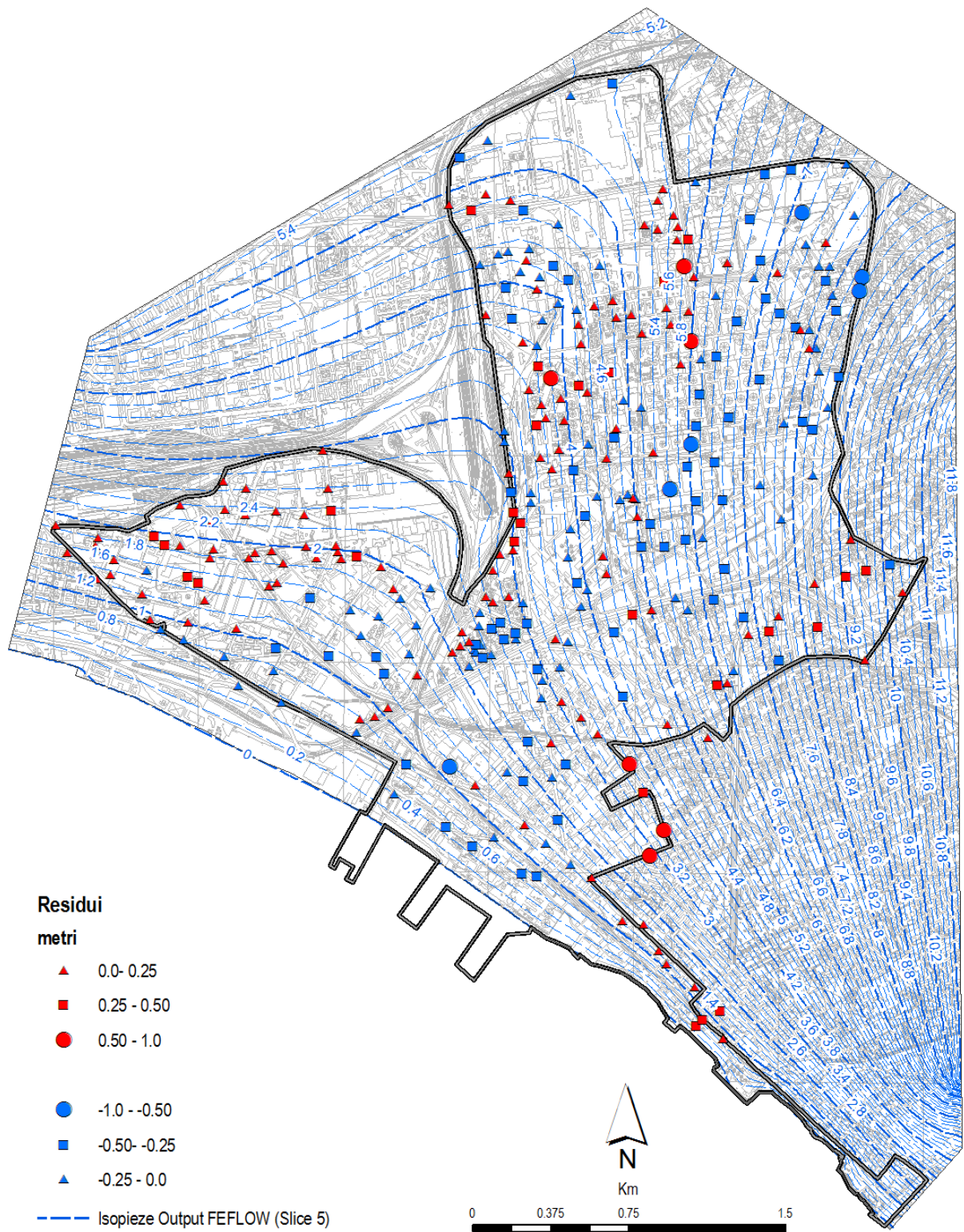


Figura 77 - Mappa dei residui dei carichi idraulici osservati e calcolati: layer 3 silce 5 - 6.

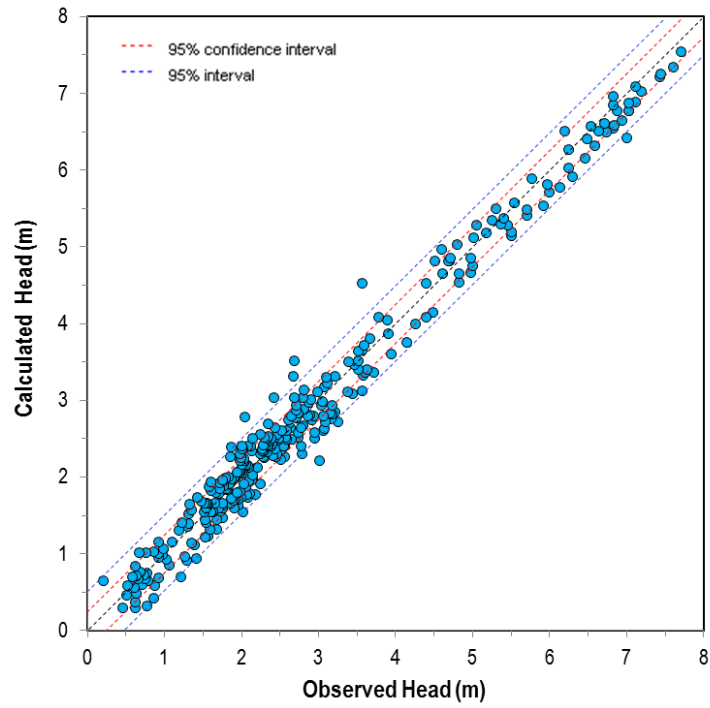


Figura 78 - Elaborazioni statistiche di calibrazione: Scatter plot dei residui.

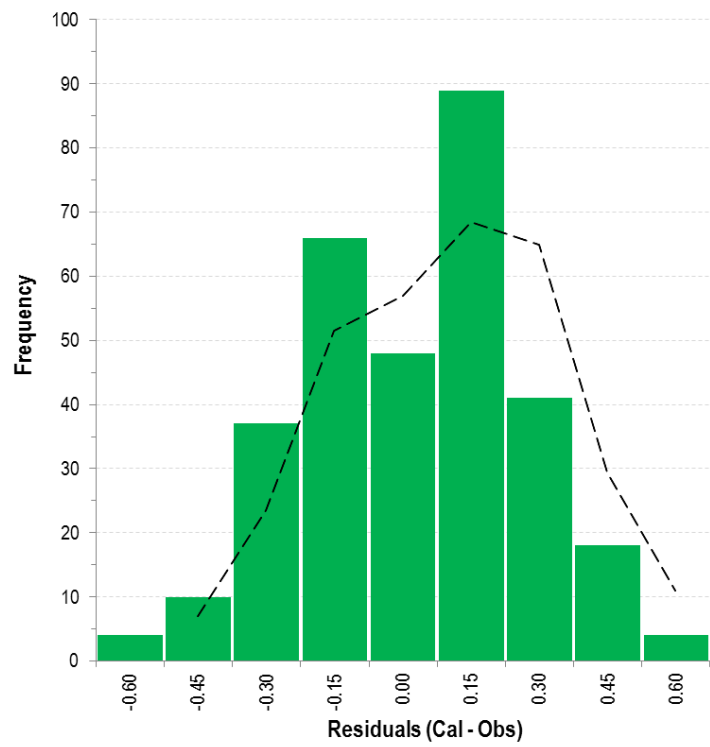


Figura 79 - Elaborazioni statistiche di calibrazione: Istogramma di frequenza dei residui.

In fase di calibrazione, durante la variazione manuale dei parametri e delle condizioni al contorno implementate, è stato possibile verificare la sensitività del modello. In particolare la presenza di numerosi pozzi di emungimenti nelle aree di bonifica ha permesso di definire il rapporto tra la portata dichiarata e gli abbassamenti attesi secondo quanto riportato dalle stesse aziende nella ricostruzione della piezometria locale. La presenza appunto di pozzi attivi ha permesso, quindi, di poter tarare i valori di conducibilità idraulica delle principali litofacies superficiali in accordo con quanto rilevato con le prove di permeabilità a disposizione. In accordo con la necessità di ottenere una soluzione del modello di flusso che fosse cautelativa ai fini della progettazione delle opere d'intervento, si è preferito scegliere tra l'insieme delle possibili soluzioni calibrate del modello quella con valori di K più elevati, ciò ha permesso di ottenere la soluzione "critica", ovvero il campo di velocità di flusso della falda massimo calibrato che in termini di progettazione permette di ottenere cautelativamente le massime portate attese nei tratti interessati dalle opere e la maggiore difficoltà nella definizione dei sistemi di sbarramento idraulico.

Il definitiva il modello messo a punto è in grado di riprodurre il campo di moto della falda superficiale e consente la valutazione del bilancio idrico complessivo. In particolare delle possibili soluzioni calibrate, il modello proposto rappresenta una delle soluzioni critiche possibili ovvero, il campo di flusso generato per ottimizzazione dei parametri del modello permette di non sottostimare le velocità di flusso e le portate in uscita dal limite marino. Di difficile interpretazione e ricostruzione sono i gradienti idraulici in ingresso dai limiti NW e SE del modello, ciò è dovuto ad una carenza dei punti di misura piezometrici al di fuori del perimetro del SIN stesso. In definitiva dall'interpretazione della soluzione del modello di flusso è possibile fare alcune considerazioni:

- è possibile riconoscere una componente di moto verticale e scambi idrici dalla porzione più profonda del complesso acquifero verso quella superficiale, nei settori SE e NW dove esistono consistenti spessori di Tufo, evidente dall'andamento obliquo e subverticale delle linee equipotenziali riportate nel modello 3D di Figura 83, Figura 84, Figura 85 e
- Figura 86;
- nella parte centrale del SIN, in cui è assente il Tufo, lungo il vecchio reticolo di drenaggio di canali, si genera un moto verticale delle acque di falda, principalmente per effetto dei pozzi e secondariamente in specifico richiamando acqua dai primi 3 layers quindi per la porzione di acquifero superiore al Tufo e almeno per i primi 10-15 metri dal p.c.. Questo appare evidente passando dalle isopiezometriche della slice 1 alla 4, con una diminuzione dell'effetto di drenaggio che svanisce per le slice 4, 5 e 6. La porzione più profonda di 20 metri della falda sembra non risentire delle perturbazioni antropiche superficiali.

Le velocità di flusso calcolate dal modello sono riportate nelle Figura 90, Figura 91 e Figura 92, rispettivamente riferite ai layer 1, 3 e 5. Dalla ricostruzione è possibile constatare come nel Layer 1 e 3, riferiti alla porzione superiore del sistema acquifero e quindi alla falda superficiale, le velocità di flusso sono ricomprese tra un massimo di 75 cm/giorno a un minimo di 2.5 cm/giorno, mentre nelle aree in bianco le velocità sono ridotte ed inferiori al minimo. Le aree in cui i deflussi sono più elevati sono quelle riferibili all'asse centrale di drenaggio della falda corrispondente all'area

depressa del paleocanale del Sebeto; nelle aree in cui vi sono le maggiori perdite di gradiente idraulico e topografico. La componente di flusso in questi settori è prevalentemente verticale e orientata verso le aree di canalizzazione in cui si è realizzato le uscite dal sistema acquifero come quantificato nel bilancio, mentre nel layer 3, a maggiori profondità della falda, le velocità si riducono decisamente con massimi di 15 cm/giorno, con aree a più bassa velocità condizionate dalla presenza dei depositi tufacei e la componente di flusso torna ad essere prevalentemente orizzontale. Ciò dimostra che l'effetto di drenaggio si esercita solo nella porzione più superficiale della falda, come visibile nella porzione centrale della sezione 3 in Figura 85, in cui le linee equipotenziali sono radiali convergenti verso il vecchio sistema di canali in superficie, il paleoalveo del Sebeto e nel settore di emungimento dei pozzi privati. Nel layer 5, il flusso si stabilizza ed è molto più omogeneo, con velocità che, nell'area del SIN, mediamente non superano i 10-15 cm/giorno, evidente la componente di afflusso delle acque sotterranee del settore SE dall'area vesuviana, con maggiori velocità di flusso (oltre 20 cm/giorno) mentre meno importante l'afflusso profondo proveniente dal settore NW.

Confrontando la soggiacenza della falda derivata dalla soluzione del modello (Figura 93) con quella ricostruita in fase concettuale (Figura 26) si ritrova una buona corrispondenza. Nella porzione più depressa della piana, si realizzano valori minimi compresi tra 0.5 e 1 metro, le aree a potenziale rischio di risorgiva e affioramento della falda è rappresentata in Figura 94, in evidenza la sovrapposizione spaziale tra le aree di risorgiva della falda e il reticolo di canali e collettori.

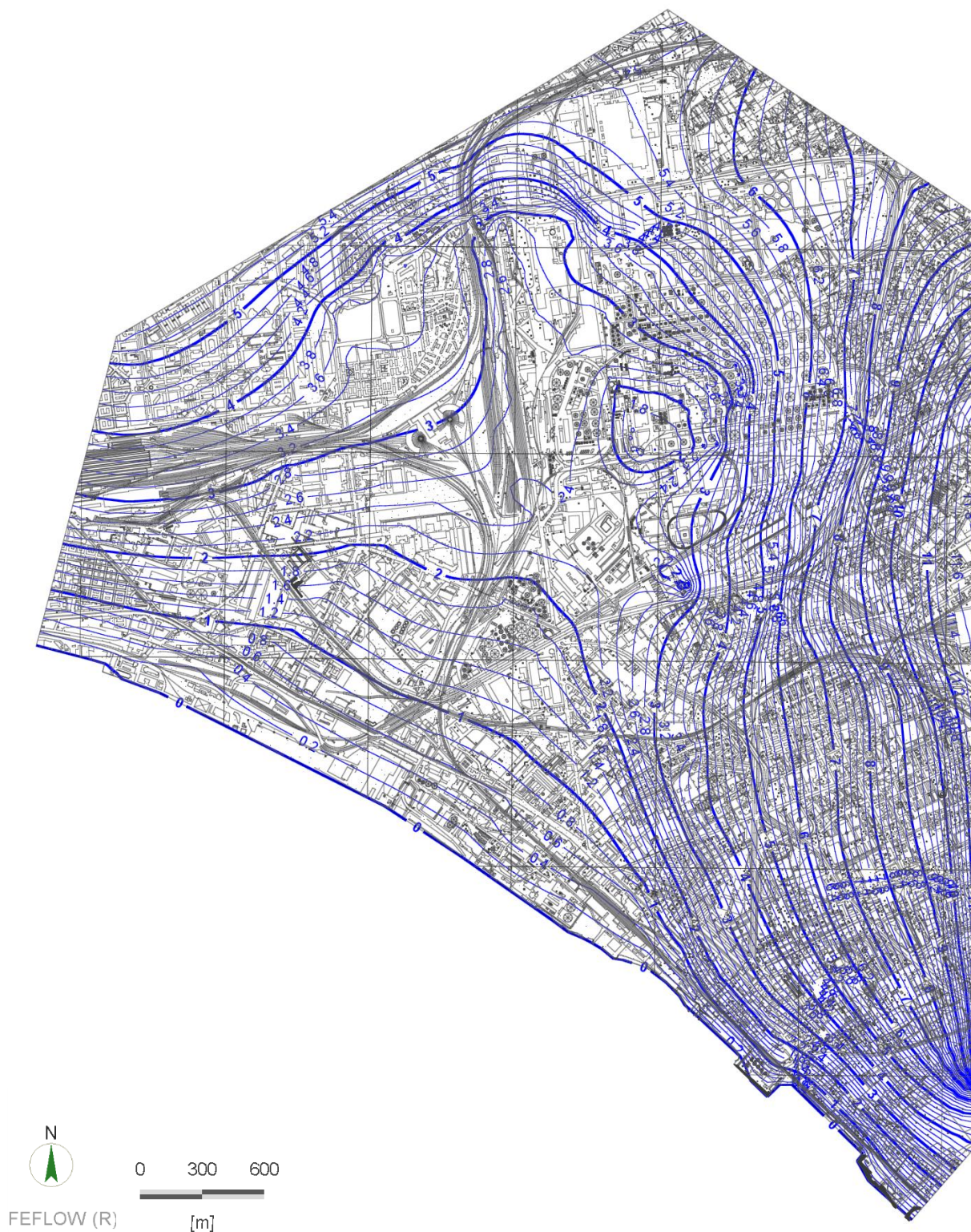


Figura 80 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 1.

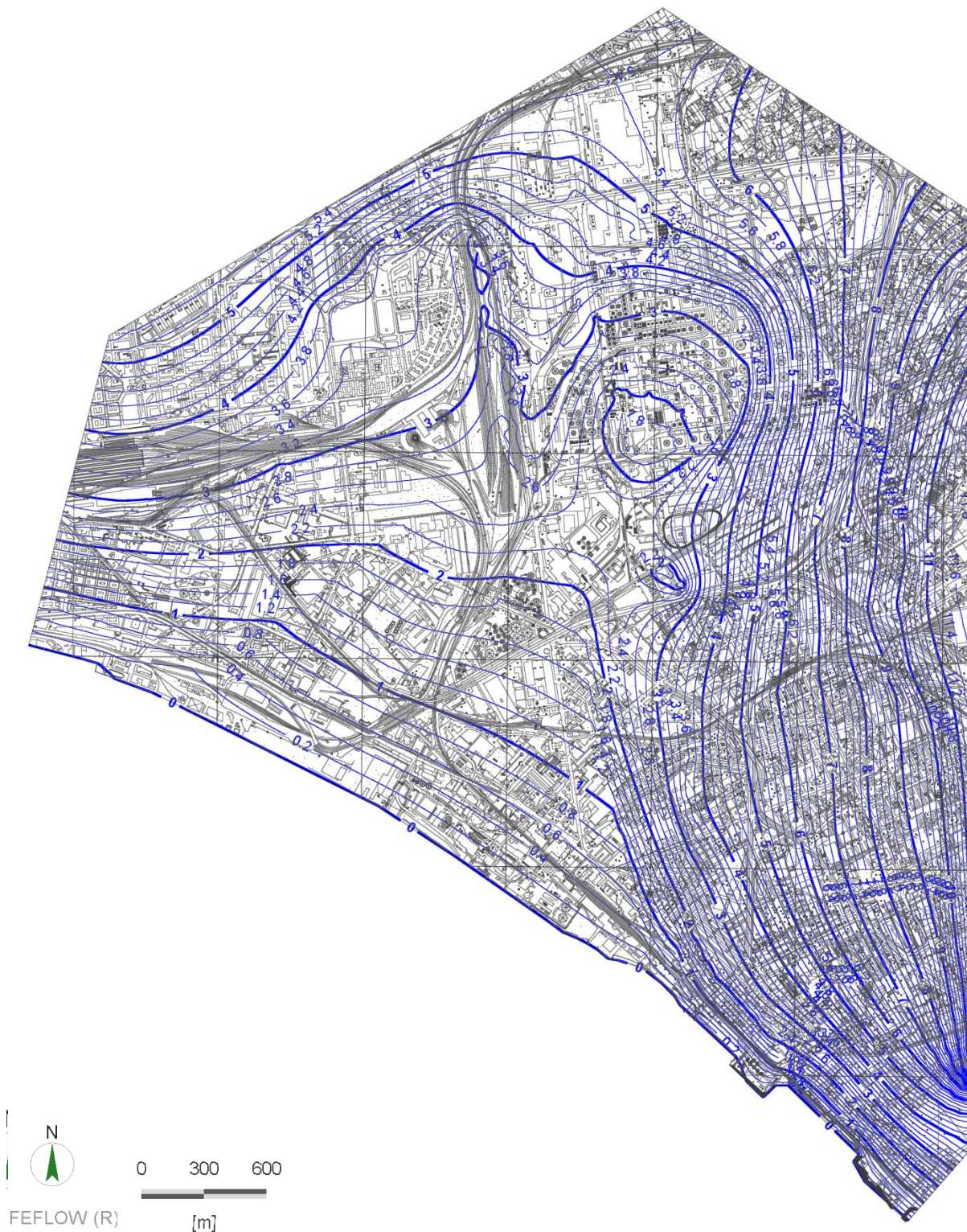


Figura 81 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 3.

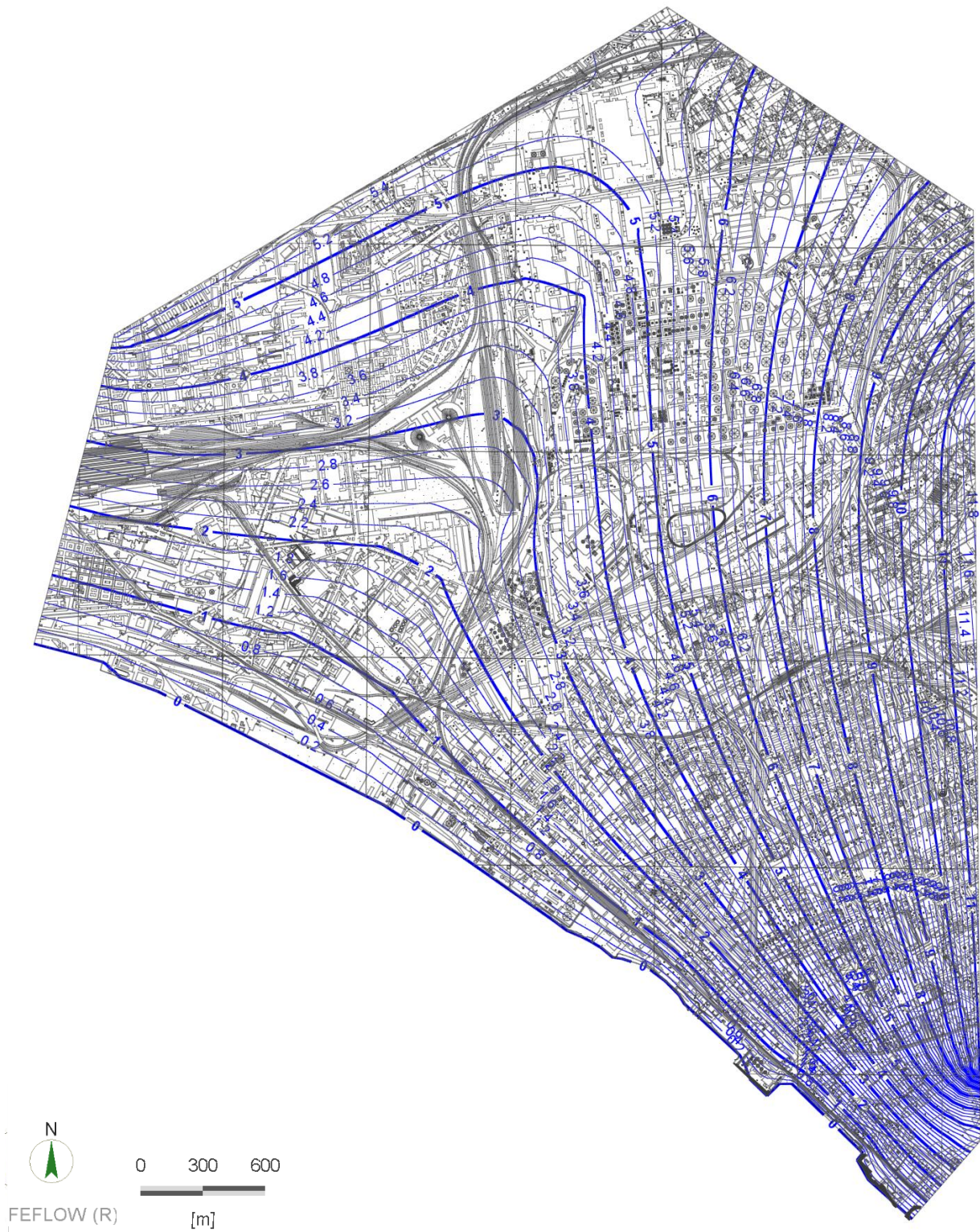


Figura 82 - Soluzione del modello di flusso: isopiezometriche slice 5.

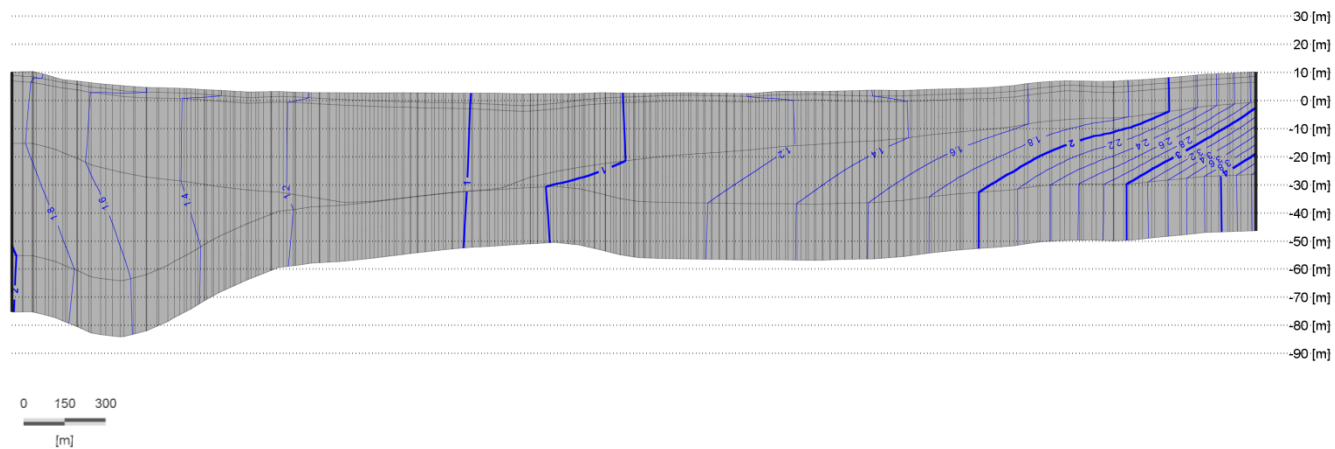


Figura 83 - Sezione idrogeologica n°1.

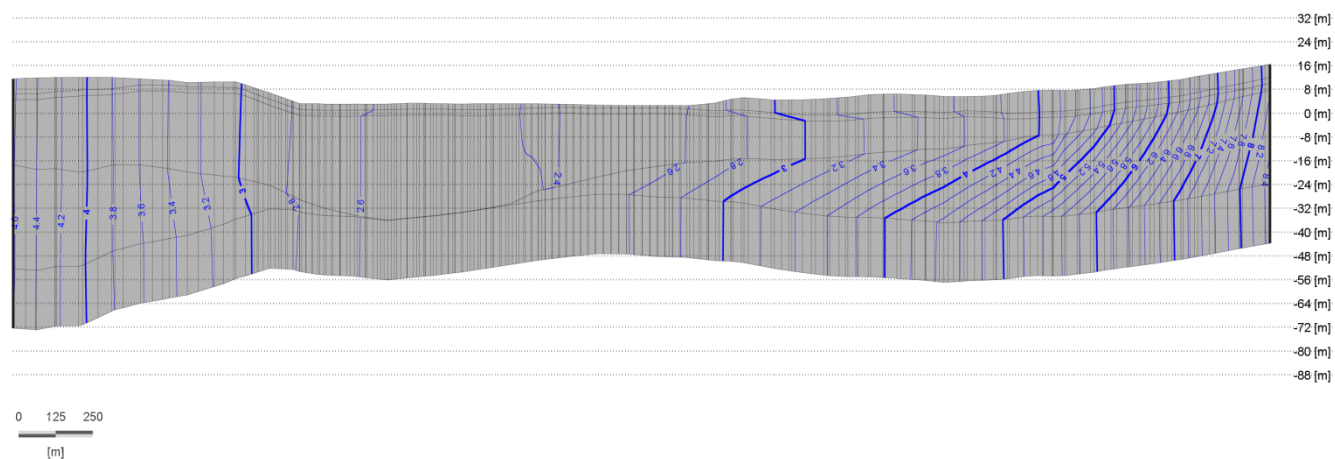


Figura 84 - Sezione idrogeologica n°2.

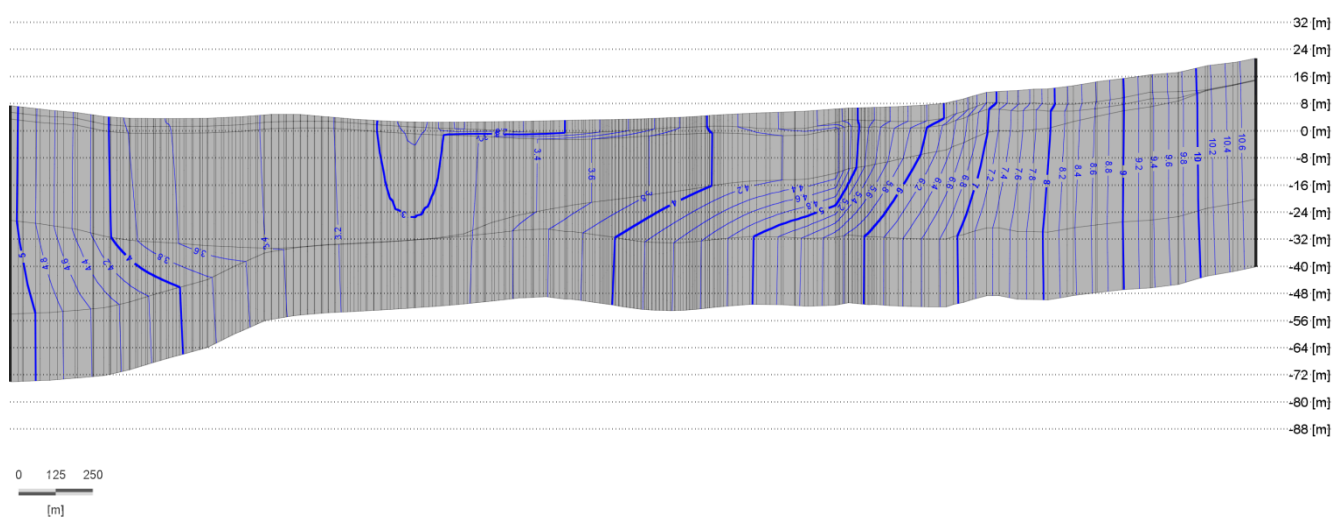


Figura 85 - Sezione idrogeologica n°3.

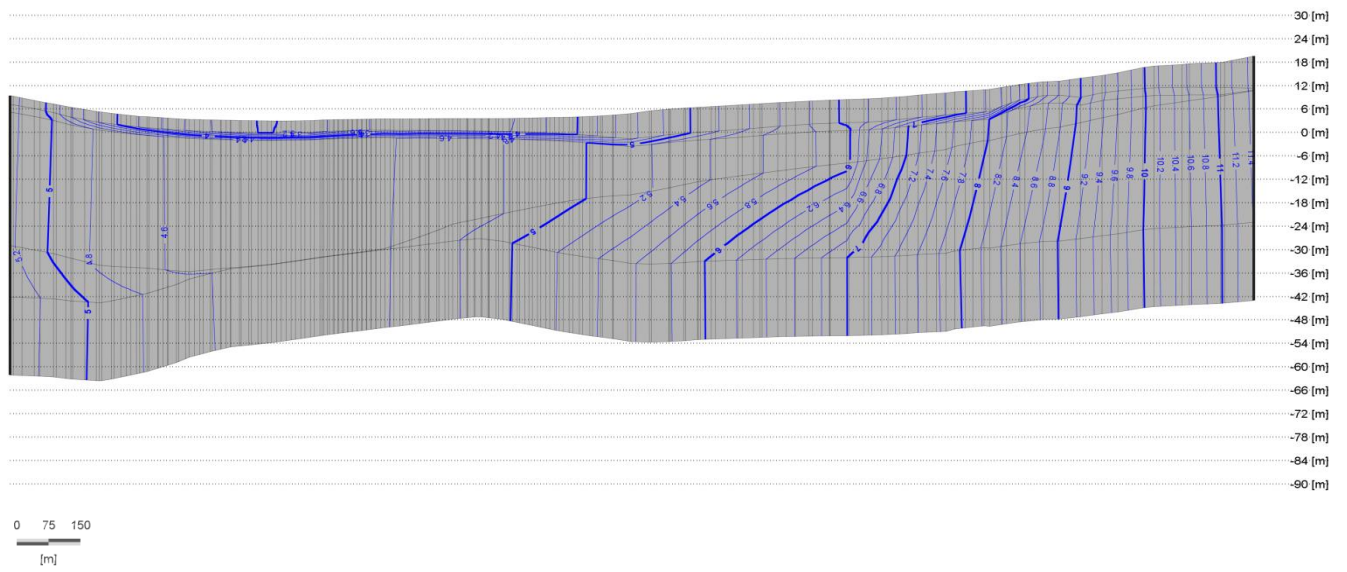


Figura 86 - Sezione idrogeologica n°4.

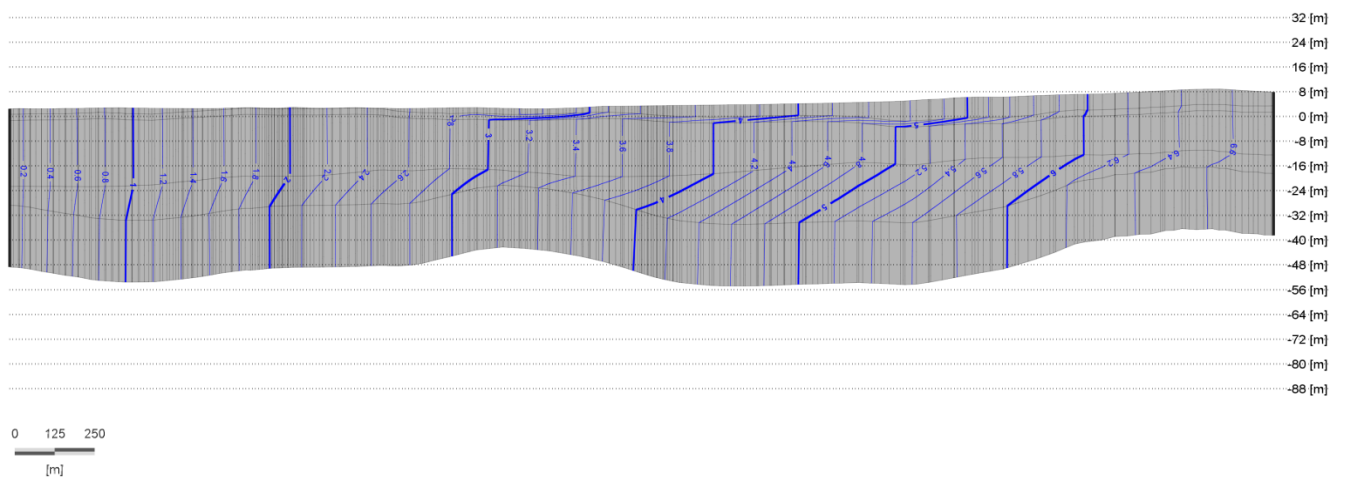


Figura 87 - Sezione idrogeologica n°6.

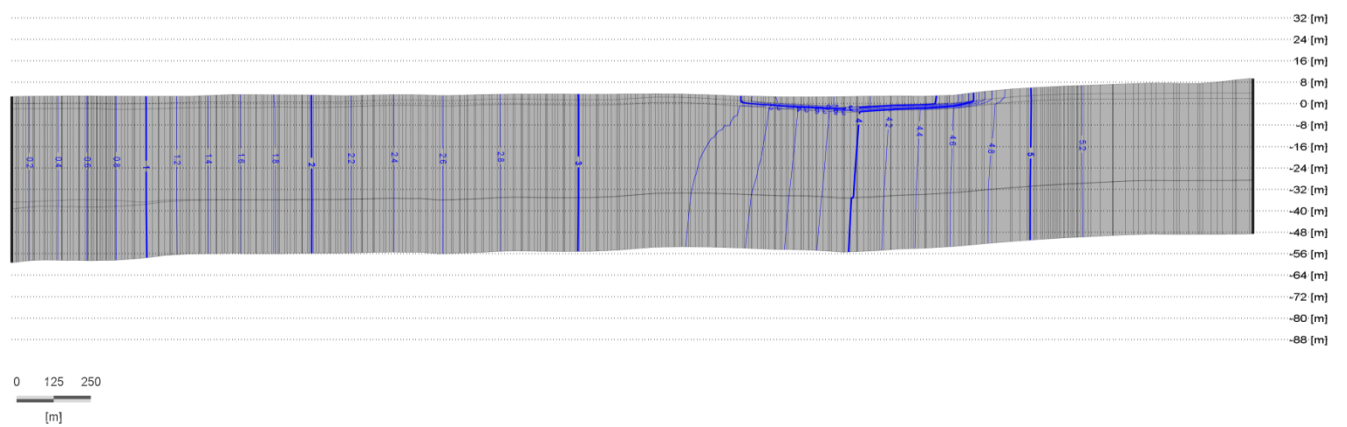


Figura 88 - Sezione idrogeologica n°7.



Figura 89 - Sezione idrogeologica n°8.

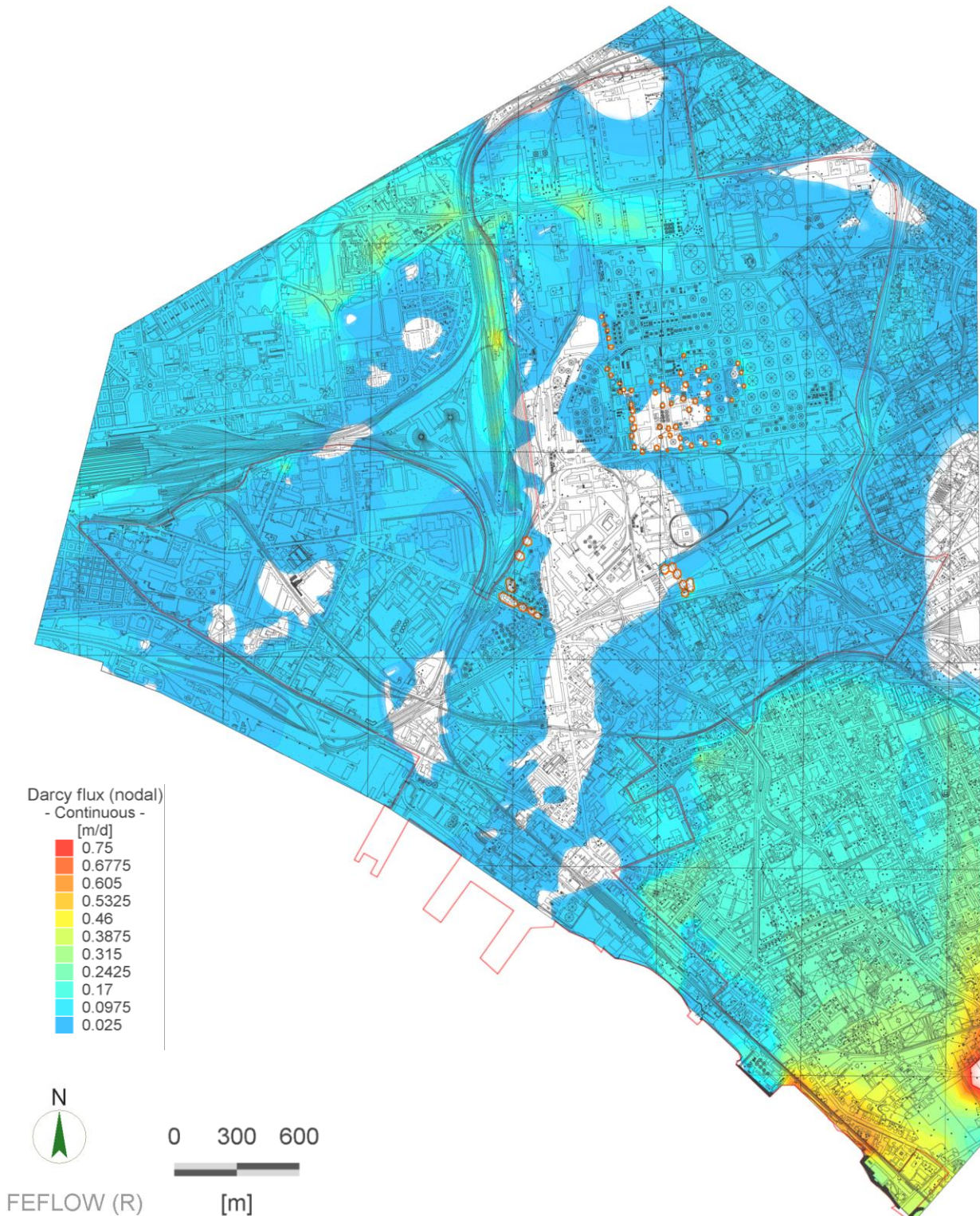


Figura 90 - Soluzione del modello di flusso: velocità di flusso calcolato al layer 1.

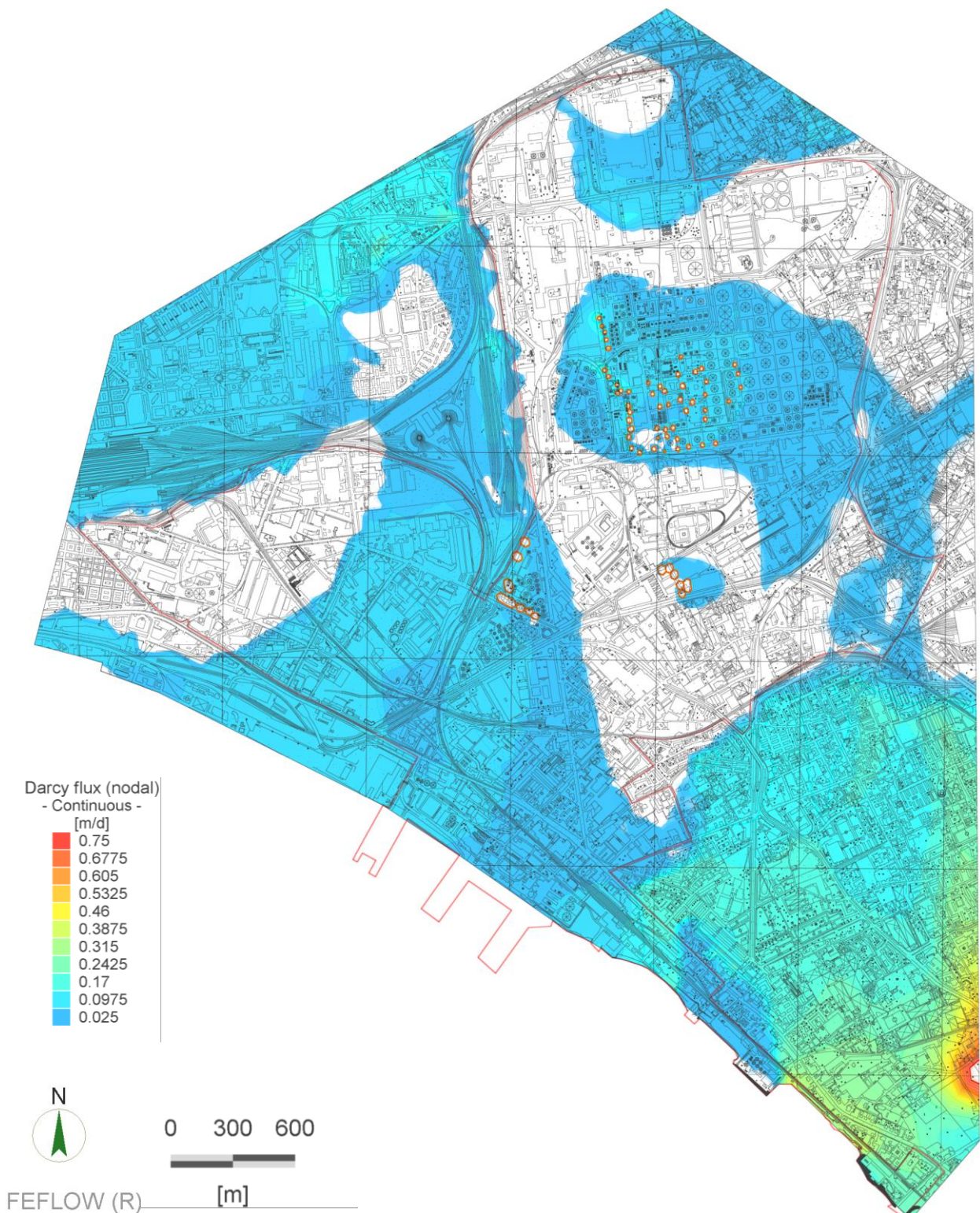


Figura 91 - Soluzione del modello di flusso: velocità di flusso calcolato al layer 3.

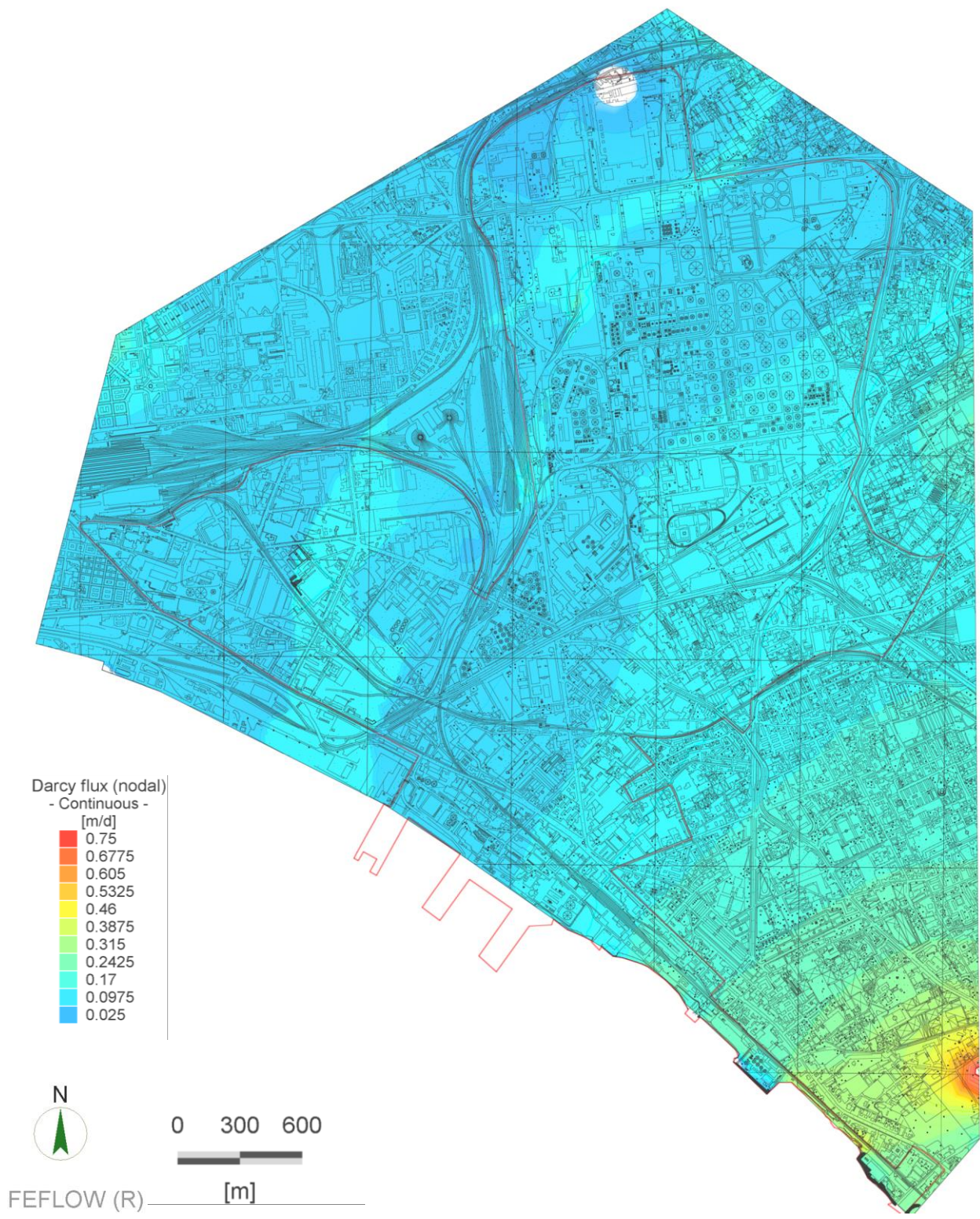


Figura 92 - Soluzione del modello di flusso: velocità di flusso calcolato al layer 5.

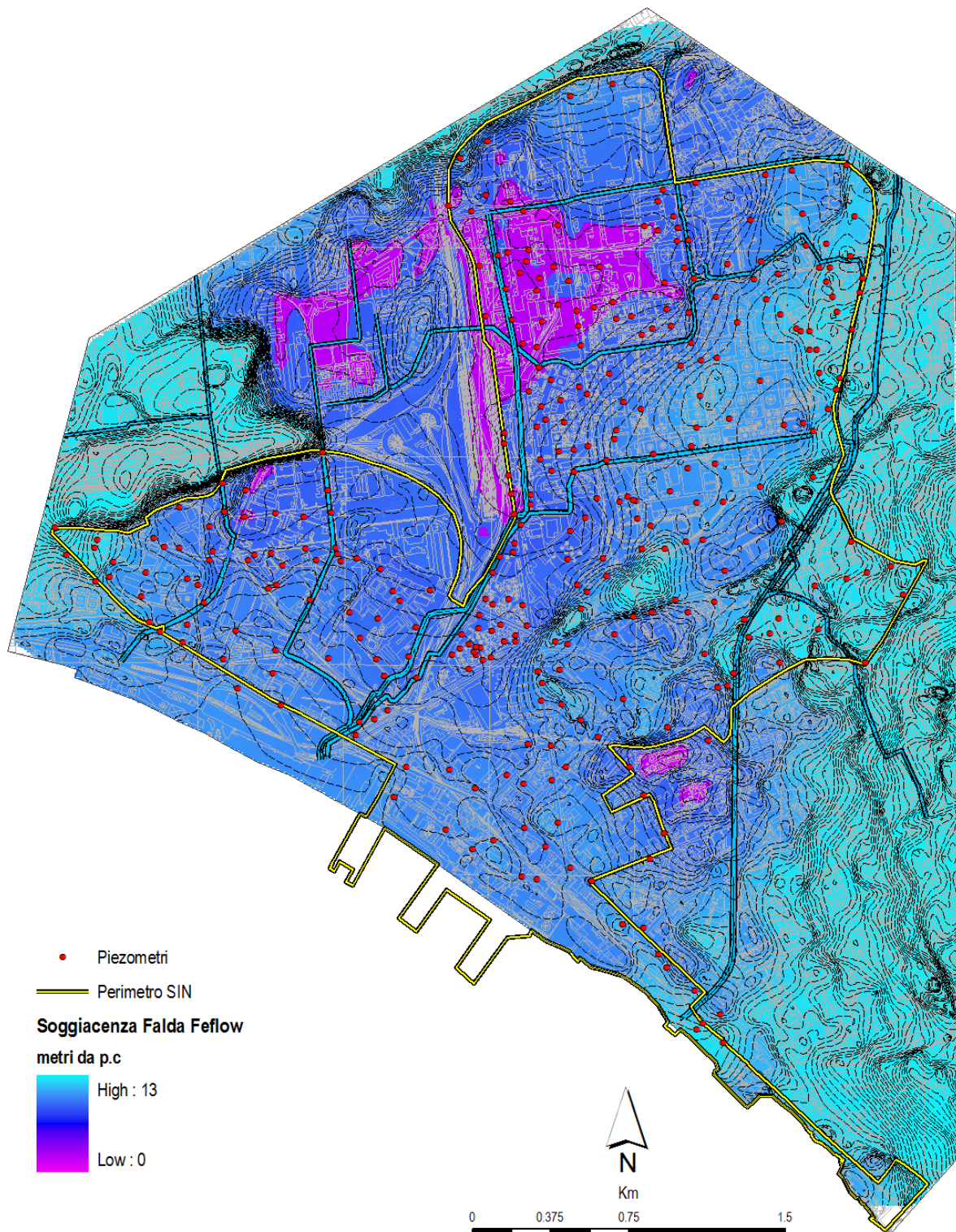


Figura 93 - Soggiacenza della falda calcolata dal modello di flusso.

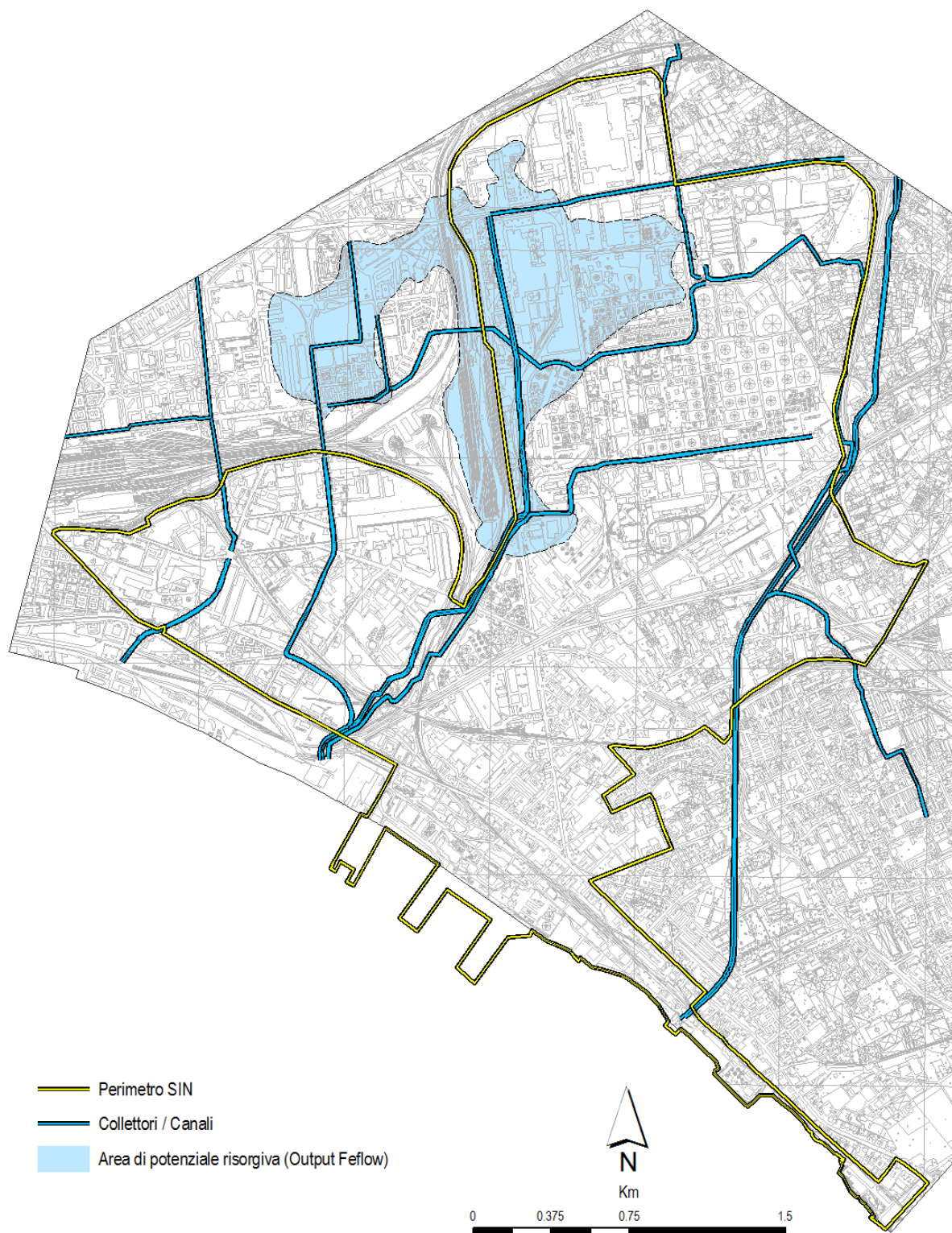


Figura 94 - Aree di potenziale risorgiva delle acque di falda calcolate dal modello.

E' necessario puntualizzare come il modello di flusso costituisce una rappresentazione "semplificata" del fenomeno che permette di definire le peculiarità del sistema di circolazione idrica sotterranea dell'area in esame nel periodo di morbida in condizioni stazionarie. La difficoltà di rappresentazione del fenomeno in esame sta nel fatto che questi è funzione del tempo e condizionato dalle numerose situazioni locali antropiche oltre che alla stagionalità. Il carattere transitorio, infatti, non è dato tanto dal cambio stagionale legato alla maggior o minore ricarica del sistema, poiché l'area è quasi completamente urbanizzata e coperta, piuttosto dalle singole attività antropiche che determinano locali situazioni di disturbo e alterazione del naturale deflusso idrico e modificazioni del quadro locale.

La presenza di pozzi privati, ad uso industriale e di riqualifica ambientale hanno governato localmente il sistema di flusso, queste nel corso degli anni hanno subito cambiamenti legati proprio all'evoluzione industriale del sito. Altro elemento d'incertezza sono le interazioni idriche tra la canalizzazione, vecchia e recente, e le acque di falda, le eventuali e possibili perdite acquedottistiche e la presenza di interferenze sotterranee al flusso con la creazione di locali effetti "diga" o "drenaggio" tipici di un'area fortemente urbanizzata, infrastrutturata in cui la soggiacenza molto limitata della falda dal piano campagna.

Appare evidente come vi siano aree in cui il carattere "transitorio" sia più marcato ed evidente, come le aree depositi Q8 ed Esso, in cui sono presenti barrieramenti idraulici e pozzi in funzione, rispetto alle aree più prossime alla linea di costa, in cui la presenza di un vincolo al contorno forte come il carico idraulico imposto dal limite marino, attribuisce stabilità al flusso e ne determina un regime "pseudo-stazionario" nel tempo con alterazioni ridotte del carico idraulico in ragione anche della minore presenza di prelievi dalla falda.

3.4 Bilancio di massa e valutazione della portata di deflusso della falda

Il modello messo a punto è in grado di riprodurre il campo di moto della falda superficiale e consente la valutazione del bilancio idrico complessivo. L'esame dei bilanci di massa calcolati dal modello mette in evidenza come il principale termine di input del bilancio idrico dell'acquifero sia costituito dagli afflussi idrici sotterranei complessivi per un totale di circa 63995 m³/giorno (Dirichlet BC) pari a 741 l/s, mentre la ricarica per precipitazioni assolve un ruolo marginale calcolata sui 3260 m³/giorno per un totale di 38 l/s (Figura 41).

I flussi in uscita verso il limite marino (Dirichlet BC) sono di circa 48120 ovvero 557 l/s pari al 72% del bilancio di output. Le portate in uscita per effetto del potenziale effetto drenaggio del sistema di canali di bonifica (Flow transfer BC) è di 3380 m³/giorno (36 l/s), mentre il drenaggio diffuso dalla superficie topografica risolto dal modello con la condizione di constrain massimo della piezometria al di sotto del livello della topografia (Constant Flow BC), è di 12222 m³/giorno (141 l/s) per un totale di drenaggio pari a 181 l/s ovvero il 23% della portata di output della falda.

Nel dettaglio si distinguono i seguenti termini di bilancio corrispondenti a determinate condizioni al contorno (BC):

Termini di input:

- Afflussi idrici sotterranei (Constant Head BC - Dirichlet) = 63595 m³/giorno (**752 l/s**):
 - Limite NW = 25755 m³/giorno (298 l/s)
 - Limite SE = 27890 m³/giorno (323 l/s)
 - Limite N = 10350 m³/giorno (120 l/s)
- Infiltrazione e perdite idriche (Constant Flow BC - Neumann) = 3260 m³/giorno (**38 l/s**)

Totale budget input = 67255 m³/giorno (778 l/s)

Termini di output:

- Deflusso verso mare (Constant Head BC - Dirichlet) = 48120 m³/giorno (**557 l/s**)
- Drenaggio verso canali = 15600 m³/giorno (**181 l/s**)
 - Drenaggio canali (Flow transfer BC - Cauchy) = 3380 m³/giorno (39 l/s)
 - Drenaggio diffuso (Constant Flow BC - Neumann) = 12220 m³/giorno (141 l/s)
- Prelievi puntuali (Constant Flow BC - Neumann) = 2904 m³/giorno (**34 l/s**)

Totale budget output = 66624 m³/giorno (771 l/s)

Dall'analisi del bilancio emerge come il principale limite di output del sistema di flusso sotterraneo sia costituito dal mare, che come recapito finale riceve il 72% della portata complessiva della falda

costiera; il restante 28% defluisce da drenaggi diffusi quali pozzi e sistemi di adduzione (18%) non rappresentabili per assenza di informazioni ma modellati e imponendo la piezometria sempre inferiore alla quota topografica, condizione verificata in fase di calibrazione, e secondariamente un'aliquota di bilancio dovrebbe essere presa in carico dal vecchio sistema di canalizzazione (5%). I prelievi dai pozzi sono pari al 4% e assolvono un ruolo marginale nel bilancio generale, ma come già commentato, non trascurabili per la comprensione locale dei flussi. Per quanto riguarda gli afflussi alla falda questi sono ripartiti in maniera simile dagli alti piezometrici presenti nel settore NW (38%) e da quello SE (41%) e in maniera ridotta dal limite N (15%). Le infiltrazioni dalla superficie topografica sono del tutto irrilevanti nel computo generale del bilancio incidendo per solo il 5%, ciò evidente dalla quasi completa impermeabilizzazione dei terreni dell'area industriale.

I valori complessivi e dei singoli termini di bilancio sono del tutto confrontabili con quelli stimati in fase di concettualizzazione idrogeologica, il modello, dunque, seppure in condizioni d'incertezza del quadro conoscitivo in riferimento alle voci di prelievo puntuale da pozzi di alcune delle principali realtà industriali, consente comunque di valutare in modo attendibile i volumi idrici in gioco e di definire il quadro generale di flusso rispettando le caratteristiche morfologiche dell'assetto piezometrico in termini di direzioni, gradienti e velocità di flusso.