

### 7.3.6 Elaborazione e analisi dei dati di portata

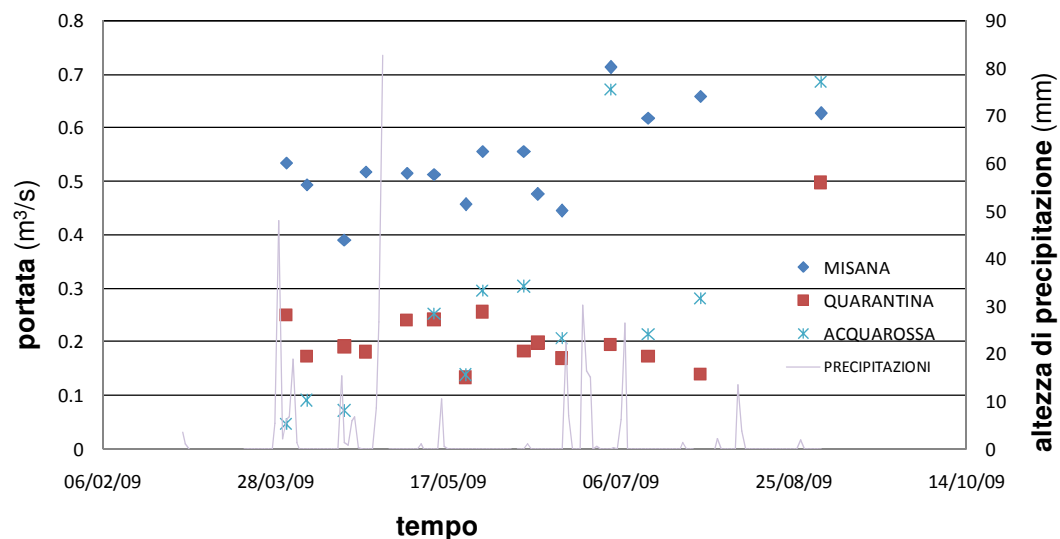
Come accennato in precedenza, misure di portata sono state eseguite in corrispondenza di tre aste fontanilizie presenti all'interno dell'area di dettaglio denominate Misana, Quarantina e Acquarossa. Quest'ultimo canale è stato suddiviso in 2 distinti tratti denominati rispettivamente Acquarossa "monte fontane" e Acquarossa "valle fontane". La portata reale del fontanile Acquarossa è determinabile sottraendo la misura "di monte" (costituita essenzialmente da scarichi e coli) a quella "di valle". In questo modo si determina la portata effettiva, costituita esclusivamente da acque risorgive. Le misure vengono eseguite con frequenza all'incirca settimanale

La *Figura 7.3.6.1* presenta l'andamento nel tempo delle portate in corrispondenza delle sezioni di misura prese in considerazione. L'intervallo temporale preso in esame è compreso fra il 31 marzo e il 2 settembre 2009.

Dall'osservazione dei grafici tempo-portate, il canale Misana risulta caratterizzato da portate generalmente più elevate. Una portata generalmente minore è evidenziata nei canali Quarantina e Acquarossa.

In quest'ultimo caso si è riscontrata in tre occasioni assenza di flusso e, conseguentemente, non è stato possibile effettuare la misura.

Le informazioni disponibili indicano un aumento delle portate in corrispondenza della stagione estiva per i canali Misana e Acquarossa, mentre per il canale Quarantina si riscontra una diminuzione delle portate. Il confronto dei dati relativi alle portate con i valori di precipitazione indica una corrispondenza solo parziale degli andamenti delle due variabili nel tempo.



## 7.4 Modello Numerico

### 7.4.1 Dominio e discretizzazione

Il problema del flusso in condizioni stazionarie è stato risolto su un modello tridimensionale sviluppato in corrispondenza dell'area individuata dal *modello alla grande scala*, delimitata a Est dal fiume Serio, a Ovest e a Sud dal fiume Adda. A Nord, in assenza di un limite idrogeologico di chiara identificazione, è stato adottato il limite precedentemente identificato all'interno di un progetto di tesi sviluppato presso il Politecnico di Milano [Rametta, 2008]. Le dimensioni del modello, il cui sistema di riferimento locale ha origine nel punto di coordinate Gauss-Boaga 1535000 E, 5012000 N, posto ad una quota di -205 m.s.l.m, sono pari a  $23 \text{ km} \times 48 \text{ km} \times 475 \text{ m}$ . Il sistema è stato discretizzato in 95 strati (gli 80 strati più superficiali sono attivi al flusso), ognuno dei quali è costituito da 55200 celle ( $230 \text{ colonne} \times 240 \text{ righe}$ ); le dimensioni di ciascuna cella sono pari a  $100 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ . Per la risoluzione del problema di flusso, si è scelto di utilizzare il codice numerico ModFlow [Mc Donald e Harbaugh, 1988].

### 7.4.2 Condizioni al contorno

Una condizione al contorno di Dirichlet è stata imposta in corrispondenza delle celle della griglia di calcolo che identificano il corso dei fiumi Adda e Serio; in particolare, l'andamento del carico piezometrico imposto corrisponde, lungo ciascuno di tali fiumi, alla quota di fondo alveo ricostruita attraverso le sezioni topografiche fornite dall'Autorità di Bacino del Po.

Una condizione di flusso (condizione di Neumann) è stata imposta lungo il confine settentrionale del modello. Le teste fontanilizie presenti sul territorio sono state inserite all'interno del modello matematico utilizzando la condizione al contorno di tipo 'Dreno'. In questo modo, la portata uscente dalle teste fontanilizie risulta proporzionale alla differenza fra il carico piezometrico all'interno dell'acquifero e l'altezza del piano campagna; la condizione di tipo 'Dreno' non ha alcun effetto sul flusso all'interno dell'acquifero quando il carico piezometrico all'interno dell'acquifero stesso si colloca a quote inferiori rispetto al piano campagna. Si è ritenuto che la condizione al contorno descritta sia in grado di simulare più opportunamente il processo idrologico associato alla presenza di un fontanile. Si sottolinea che il numero totale di teste fontanilizie censite all'interno del territorio in esame risulta pari a 161 (Regione Lombardia, 2006; Provincia di Cremona – Atlante Ambientale). Poiché, in un buon numero di casi, i fontanili sono situati ad una distanza molto ravvicinata fra di loro, inferiore alle dimensioni di discretizzazione del dominio (pari a  $100 \times 200 \text{ m}$ ), si sono verificate diverse situazioni in cui all'interno di una stessa cella della griglia risultavano collocarsi

due o più teste fontanilizie. Di conseguenza, la condizione al contorno di tipo ‘Dreno’ è stata associata a 138 celle.

### 7.4.3 I termini di prelievo

I prelievi di acqua dal sistema acquifero all’interno della regione in esame sono destinati a coprire i fabbisogni idrici in campo idropotabile, industriale ed irriguo.

Il quantitativo di risorsa idrica destinato ad approvvigionamento idropotabile è garantito da un insieme di pozzi di proprietà pubblica che attingono generalmente all’interno del corpo idrico più profondo, ritenuto il più protetto da eventuali processi di contaminazione. Il fabbisogno di ogni singolo comune si può stimare a partire dal numero di abitanti residenti e da un valore medio della dotazione idrica giornaliera pro-capite, fissato in questo caso pari a  $250 \text{ l}/(ab \times d)$ .

Le quantità estratte a fini industriali e irrigui, aggregate a livello comunale, sono riportate all’interno del Catasto delle Utenze Idriche, disponibile sul *Portale della Regione Lombardia*. La quantità totale di risorsa idrica estratta dall’acquifero a fini industriali e irrigui è stata calcolata all’interno del bilancio idrologico descritto nell’*Allegato D*. In assenza di un registro completo relativo alla localizzazione di tutti i pozzi all’interno della territorio in esame, si è scelto di modellare i prelievi tramite pozzi ubicati in corrispondenza del baricentro di ciascun comune. In relazione alle informazioni acquisite, la fenestrazione relativa ai pozzi utilizzati per scopi idropotabili è stata collocata ad una profondità compresa fra 60 e 80 m rispetto al piano campagna, quella relativa ai pozzi ad uso industriale ad una profondità compresa fra 40 e 50 m e infine quella relativa ai pozzi ad uso irriguo ad una profondità compresa fra 20 e 30 m. Il quadro generale dei pozzi noti ubicati all’interno dell’area di studio è contenuto all’interno delle *Tabelle A3, A4, A5 dell’Allegato A*.

### 7.4.4 I termini di ricarica

All’interno del modello matematico sono stati inseriti i seguenti termini di ricarica:

- Infiltrazione di acque meteoriche
- Infiltrazione di acque irrigue
- Percolazione da canali

I valori del termine di ricarica riconducibile ad infiltrazione di acque meteoriche sono stati stimati in corrispondenza di sette sottoregioni distinte all’interno dell’area del modello alla grande scala, come descritto nell’*Allegato D*.

Il quantitativo di risorsa idrica che ricarica il corpo acquifero in seguito ad infiltrazione di acque irrigue e a percolazione da canali è stato invece distribuito in maniera uniforme sull’intera superficie del *modello alla grande scala*. Si ritiene che la conseguente approssimazione sia giustificata dal fatto che l’area in esame è sostanzialmente

omogenea dal punto di vista della destinazione d'uso del territorio. Ad esclusione di centri abitati di piccole e medie dimensioni, sull'intero territorio viene praticata un'agricoltura di tipo intensivo resa possibile dalla disponibilità di acqua distribuita attraverso un fitto reticolo di canali.

#### **7.4.5 I dati di calibrazione**

Le informazioni utilizzate per la fase di calibrazione sono costituite da un insieme di dati piezometrici registrati nell'anno 2003. La scelta di adottare l'anno 2003 come anno di riferimento per la calibrazione del modello di flusso è dovuta al fatto che per tale anno si ha a disposizione il maggior numero di misure piezometriche. I dati sono stati inseriti all'interno del modello matematico attraverso pozzi di osservazione ubicati in corrispondenza della localizzazione dei pozzi monitorati. Per ciascun pozzo, il dato piezometrico osservato è stato associato alla profondità a cui è collocata la fenestratura del pozzo stesso oppure, in assenza di tale informazione, alla profondità a cui il pozzo è stato perforato. Sono stati esclusi i punti di monitoraggio per i quali non sono risultate disponibili informazioni relative a profondità dei filtri o profondità di perforazione. Sono stati utilizzati, pertanto, 82 dei 117 dati piezometrici misurati nel 2003. I dati piezometrici utilizzati per la calibrazione sono elencati nell'*Allegato B*.

In una fase successiva sono stati utilizzati anche i valori di carico e di portata misurati all'interno dell'area di analisi di dettaglio in cui, nel corso dello studio, è stata approntata la rete di monitoraggio descritta al *Paragrafo 7.3*.

### **7.5 Distribuzione tridimensionale dei litotipi e campi di permeabilità associati**

Sono stati sviluppati due modelli concettuali finalizzati alla caratterizzazione dell'acquifero dal punto di vista della distribuzione tridimensionale della conduttività idraulica, denominati: (1) modello di mezzo composito e (2) modello a continui multipli. Come precedentemente descritto, l'analisi delle informazioni di tipo litologico ha portato ad identificare cinque differenti tipologie di geo-materiali presenti all'interno di un sistema schematicamente riconducibile a due spessori acquiferi cui si interpone un orizzonte acquitrando. La variabilità spaziale di ciascuna categoria litologica considerata, all'interno di ciascuno dei tre spessori individuati, è stata analizzata tramite una procedura a variabili indicizzate [Guadagnini *et al.*, 2004].

A ciascuna categoria litologica è stato associato un (range di) valori di conducibilità idraulica ed è stata condotta una procedura di calibrazione dei valori di conduttività idraulica in funzione dei carichi idraulici osservati nell'area di interesse.



L'interpretazione dei dati sperimentali è stata effettuata attraverso un'analisi multi – modello che prevede la discriminazione del modello più affidabile attraverso tecniche di selezione quali i Model Validation Criteria o i Posterior Criteria.

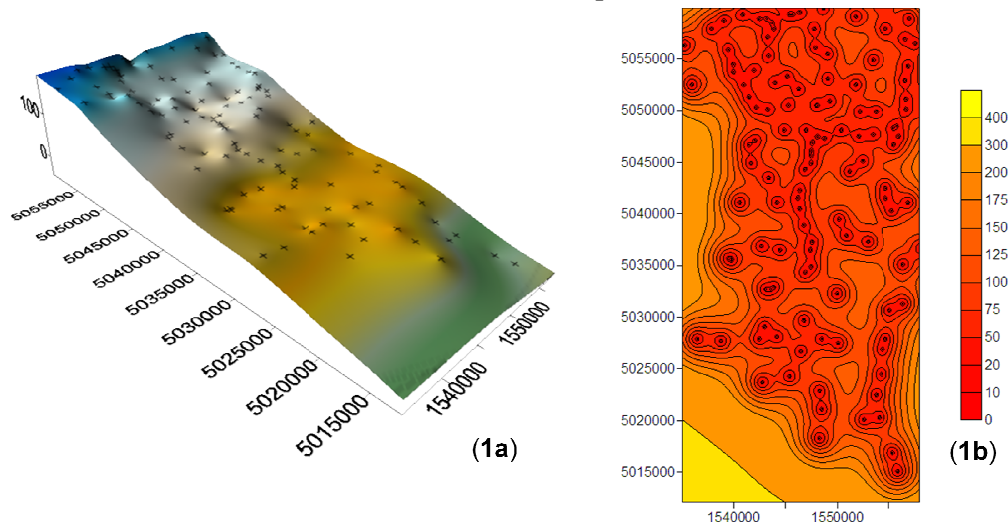
Si è valutato come le diverse concettualizzazioni della distribuzione spaziale delle variabili idrogeologiche (in particolare, conduttività idraulica) influiscano sui risultati forniti dalla modellazione del flusso, ossia sulla distribuzione dei carichi idraulici.

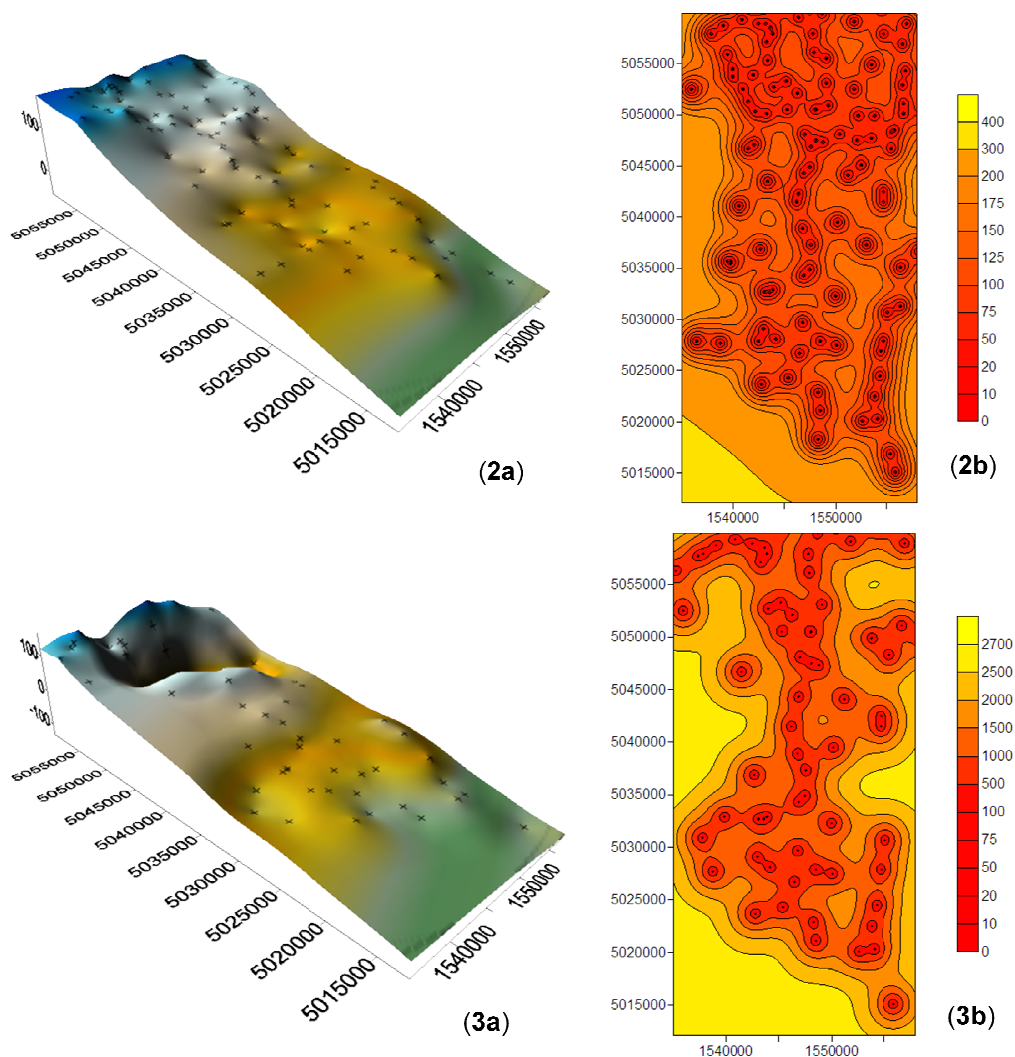
Vengono di seguito descritte le due tipologie di approccio considerate e i risultati della calibrazione. Ulteriori dettagli sulle analisi eseguite vengono forniti al *Capitolo 10*.

### 7.5.1 Ricostruzione delle superfici di separazione dei sottodomini modellati

Un'analisi volta alla stima dell'andamento spaziale delle tre superfici di separazione (tetto dello spessore intermedio, base dello spessore intermedio, base del sistema acquifero modellato) è stata condotta a partire dalle informazioni disponibili dalle colonne stratigrafiche seguendo una procedura di tipo geostatistico che ha consentito di associare alla stima dei valori (quota della superficie sul livello del mare), la corrispondente incertezza di stima quantificata dalla varianza dell'errore di stima. I dettagli della procedura sono descritti al *Capitolo 10*.

Le superfici ottenute e i campi di varianza ad esse associate sono riportati nella *Figura 7.5.1.1* dove è indicata anche la localizzazione dei punti di condizionamento utilizzati.





**Figura 7.5.1.1:** Tetto dello spessore intermedio (1a), base dello spessore intermedio (2a), base del sistema acquifero modellato (3a) e relativi campi di varianza (1b, 2b, 3b)

La ricostruzione della distribuzione della conduttività idraulica è stata ottenuta, separatamente, all'interno di ciascun spessore secondo le metodologie di seguito descritte.

## 7.5.2 Modello di mezzo composito

La ricostruzione della distribuzione dei litotipi si basa sull'applicazione del metodo di kriging ad indicatori. L'approccio sviluppato in questo contesto è una estensione del lavoro di *Guadagnini et al.* [2004], in cui si considerano due litotipi. In dettaglio, per ciascun spessore individuato all'interno del sistema, si eseguono i seguenti passi:

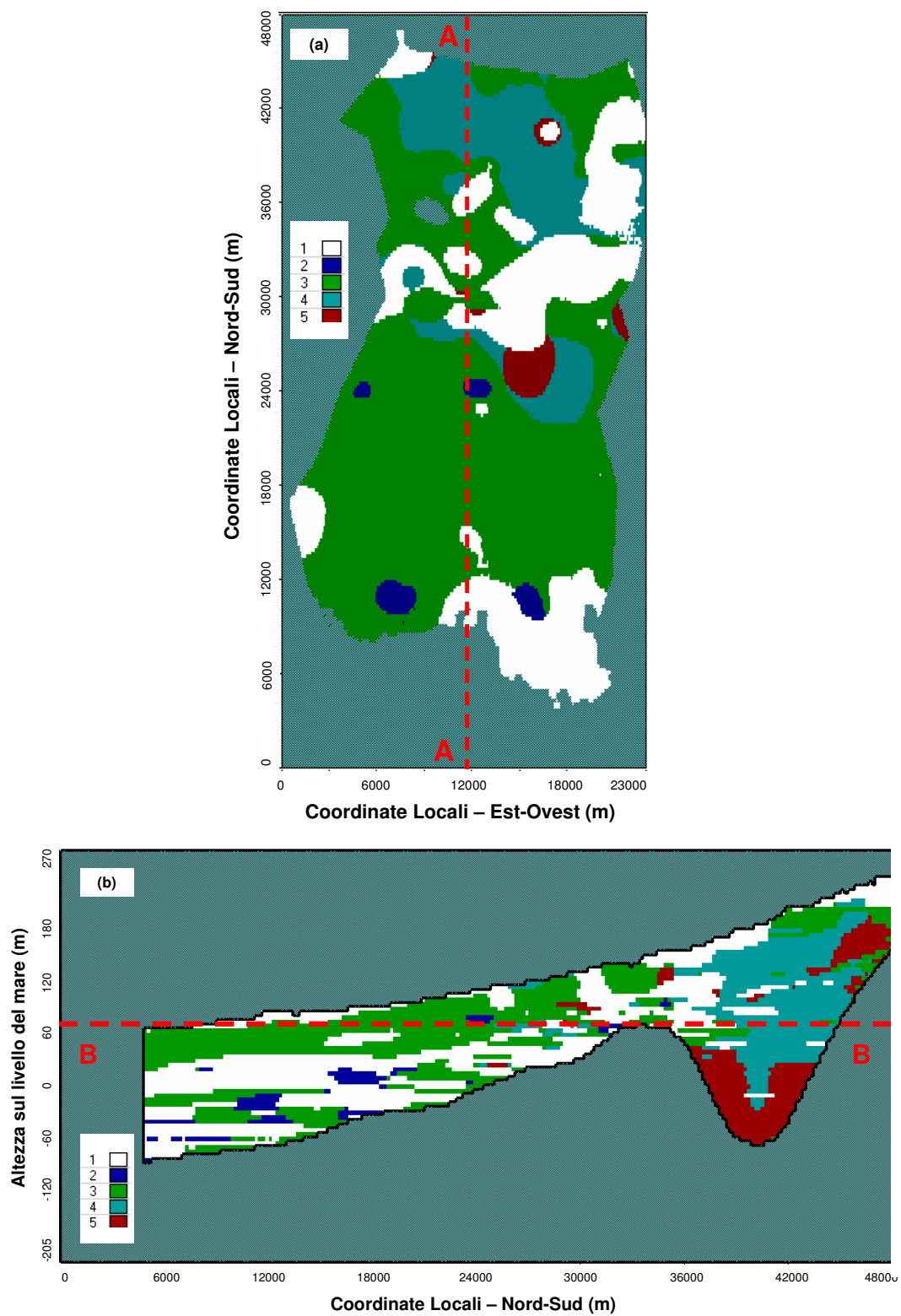
1. le informazioni stratigrafiche, rappresentate in termini di variabili discrete di valore compreso fra 1 e  $n$  e associate alle singole unità lito-stratigrafiche,

vengono inizialmente riclassificate associando un valore dell'indicatore pari a 1 alla Categoria 1, mentre alle restanti categorie (Categorie 2, 3,...,n) viene associato un valore nullo dell'indicatore;

2. si procede alla costruzione dei variogrammi ad indicatori verticali ed orizzontali e alla loro interpretazione attraverso diversi modelli teorici (sferico, esponenziale, gaussiano) al fine di individuare le grandezze di correlazione di interesse (sill, range ed, eventualmente, nugget);
3. il modello di variogramma teorico che meglio interpreta il variogramma sperimentale viene scelto sulla base di opportuni criteri di discriminazione di modelli;
4. si procede quindi all'esecuzione di un kriging ad indicatori tridimensionale;
5. la delimitazione del volume occupato dalla Categoria 1 viene effettuata secondo la procedura suggerita da *Guadagnini et al.* [2004];
6. si eliminano i dati stratigrafici relativi alla Categoria 1, si associa alla Categoria 2 un valore dell'indicatore pari a 1 e alle restanti categorie (Categorie 3, 4,...,n) un valore nullo dell'indicatore;
7. si ripetono i passi 2 – 5 all'interno della porzione di dominio esterna alla regione occupata dalla Categoria 1, giungendo alla delimitazione del volume occupato dalla Categoria 2.

I passi sopra esposti sono quindi ripetuti in successione, eliminando di volta in volta i dati relativi alla categoria per cui si è stimata la distribuzione spaziale. Si giunge ad una ricostruzione della distribuzione dei geo-materiali consistente le corrispondenti frazioni volumetriche osservate.

Il metodo fornisce in uscita la distribuzione spaziale degli  $n$  litotipi considerati, ricostruita secondo lo schema proposto da *Guadagnini et al.* [2004]. La distribuzione spaziale dei 5 litotipi individuati nella regione interessata dal modello matematico sulla base dell'approccio di mezzo composito è rappresentata in *Figura 7.5.2.1*.



**Figura 7.5.2.1:** Stima della distribuzione spaziale dei 5 litotipi individuati nella regione interessata dal modello matematico: (a) vista in pianta del layer 40 (Sez. B-B) e (b) sezione verticale in corrispondenza della colonna 120 (Sez. A-A)

### 7.5.3 Modello a continui multipli

Come il modello descritto nel paragrafo precedente, si basa su un approccio di kriging ad indicatori per generare un campo di conduttività. La procedura adotta un algoritmo di assegnazione del valore di conduttività ad ogni singola cella che combina (a) le percentuali volumetriche di ogni singola categoria stimate all'interno di ciascuna cella attraverso l'algoritmo di kriging e (b) i valori di conduttività assegnati ad ogni singola categoria. In dettaglio, la procedura è costituita dai seguenti passaggi:

1. i dati stratigrafici, rappresentati da variabili categoriche di valore compreso fra 1 e  $n$ , vengono riclassificati secondo la seguente modalità:
  - a. alla Categoria 1 viene associato un valore dell'indicatore pari a 1
  - b. alle restanti categorie (Categorie 2, 3, ...,  $n$ ) viene associato un valore dell'indicatore pari a 0;
2. si procede alla costruzione dei variogrammi ad indicatori verticali ed orizzontali e alla loro interpretazione attraverso modelli matematici;
3. dopo aver individuato il modello che meglio interpreta i dati sperimentali, si procede alla realizzazione del campo di kriging tridimensionale; a questo punto, il valore associato ad ogni singola cella rappresenta la percentuale volumetrica della Categoria 1 all'interno della cella stessa;
4. la procedura, applicata alla Categoria 2, riparte dal punto 1, dopo aver:
  - a. associato alla Categoria 2 un valore dell'indicatore pari a 1
  - b. associato alle restanti categorie (Categorie 1, 3, ...,  $n$ ) un valore dell'indicatore pari a 0;
5. si procede fino al punto 4, al termine del quale sarà stata stimata la percentuale volumetrica della Categoria 2 all'interno di ciascuna cella;
6. si ripetono iterativamente i passaggi dal punto 1 al punto 4 per le restanti Categorie, in modo tale da stimare la percentuale volumetrica di ogni singola categoria all'interno delle celle che costituiscono la griglia di calcolo del modello matematico;
7. il valore di conduttività associato ad ogni singola cella del dominio viene calcolato come media pesata dei valori di conduttività associati alle  $n$  unità lito-stratigrafica rispetto alla percentuale volumetrica di ciascuna di esse all'interno di ciascuna cella.

Il risultato ottenuto nei passaggi intermedi della procedura sopra descritta è assimilabile ad una percentuale volumetrica del generico geo-materiale nella singola cella.

Fondamenti teorici, dettagli e risultati delle analisi geostatistiche condotte sono riportati al *Capitolo 10*.

Nel caso del modello a continui multipli non è agevole una visualizzazione diretta e completa dei risultati come per il modello precedente in quanto per ogni cella del

sistema è presente un valore diverso di permeabilità, associato a diverse frazioni volumetriche di litotipi.

## 7.6 Modello inverso

### 7.6.1 Valori di permeabilità stimati

Per semplicità, si è considerato un campo isotropo di conducibilità idraulica.

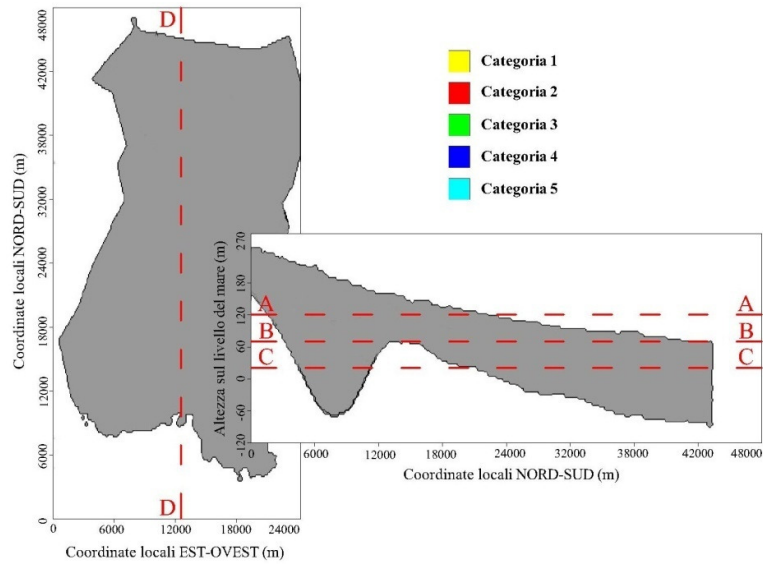
A seguito del processo di calibrazione, sono stati ottenuti, per i due modelli concettuali utilizzati, i valori ottimali di permeabilità che meglio interpretano i carichi idraulici provenienti dalle elaborazioni delle osservazioni. Nella *Tabella 7.6.1.1* riportata di seguito sono indicati i parametri calibrati per i due modelli.

**Tabella 7.6.1.1:** Valori calibrati di conducibilità idraulica

Categoria	Mezzo composito	Continui multipli
	[m/s]	[m/s]
1	4.38E-08	7.71E-08
2	1.03E-06	5.35E-05
3	5.0E-04	5.0E-04
4	7.63E-6	4.99E-06
5	5.0E-03	5.0E-03

Nella fase di calibrazione si sono evidenziate difficoltà a stimare il valore di conduttività per le categorie 3 e 5. Per entrambi i modelli il parametro raggiunge il limite dell'intervallo di valori all'interno del quale viene fatto variare.

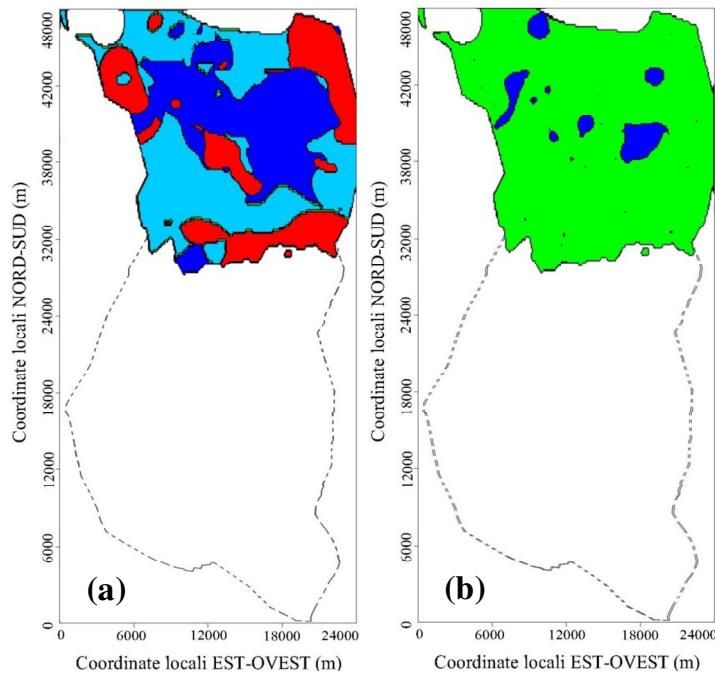
Di seguito è riportata la rappresentazione dei risultati al termine del processo di calibrazione in corrispondenza delle sezioni mostrate in *Figura 7.6.1.1*. La *Tabella 7.6.1.1* mostra gli intervalli di valori di conducibilità idraulica visualizzati nelle Figure 7.6.1.2 – 7.6.1.5.



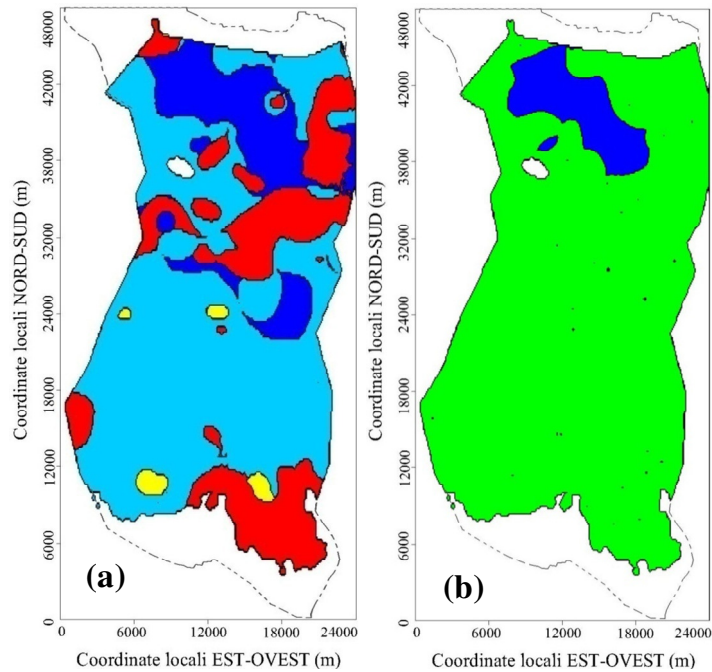
**Figura 7.6.1.1:** Indicazione delle sezioni rappresentate

**Tabella 7.6.1.1:** Valori soglia utilizzati per la visualizzazione dei risultati di conducibilità idraulica

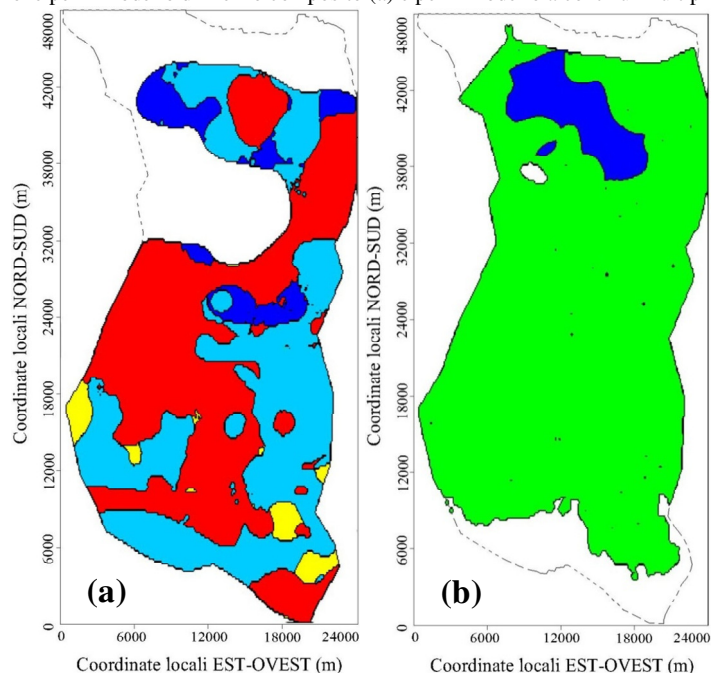
Categoria	Limite inferiore [m/s]	Limite superiore [m/s]
1	-	5.00E-08
2	5.00E-08	5.00E-06
3	5.00E-06	1.00E-04
4	1.00E-04	5.00E-03
5	5.00E-03	-



**Figura 7.6.1.2:** Sezione A-A (layer 30) – distribuzione spaziale dei valori di conducibilità idraulica al termine del processo di calibrazione per il modello di mezzo composito (a) e per il modello a continui multipli (b)

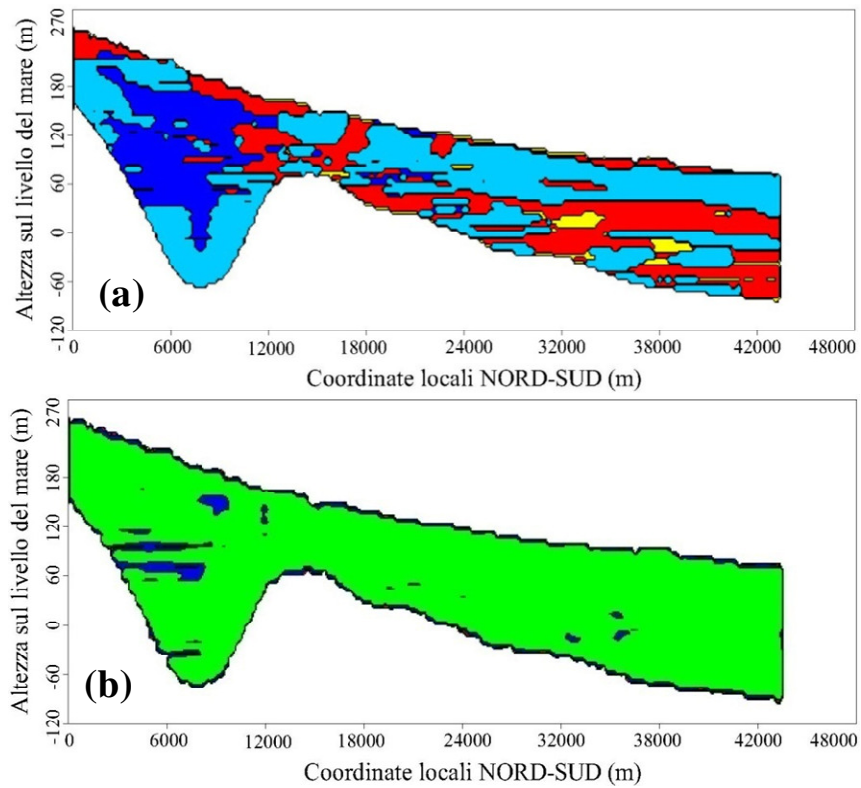


**Figura 7.6.1.3:** Sezione B-B (layer 40) – distribuzione spaziale dei valori di conducibilità idraulica al termine del processo di calibrazione per il modello di mezzo composito (a) e per il modello a continui multipli (b)



**Figura 7.6.1.4:** Sezione C-C (layer 50) - distribuzione spaziale dei valori di conducibilità idraulica al termine del processo di calibrazione per il modello di mezzo composito (a) e per il modello a continui multipli (b)



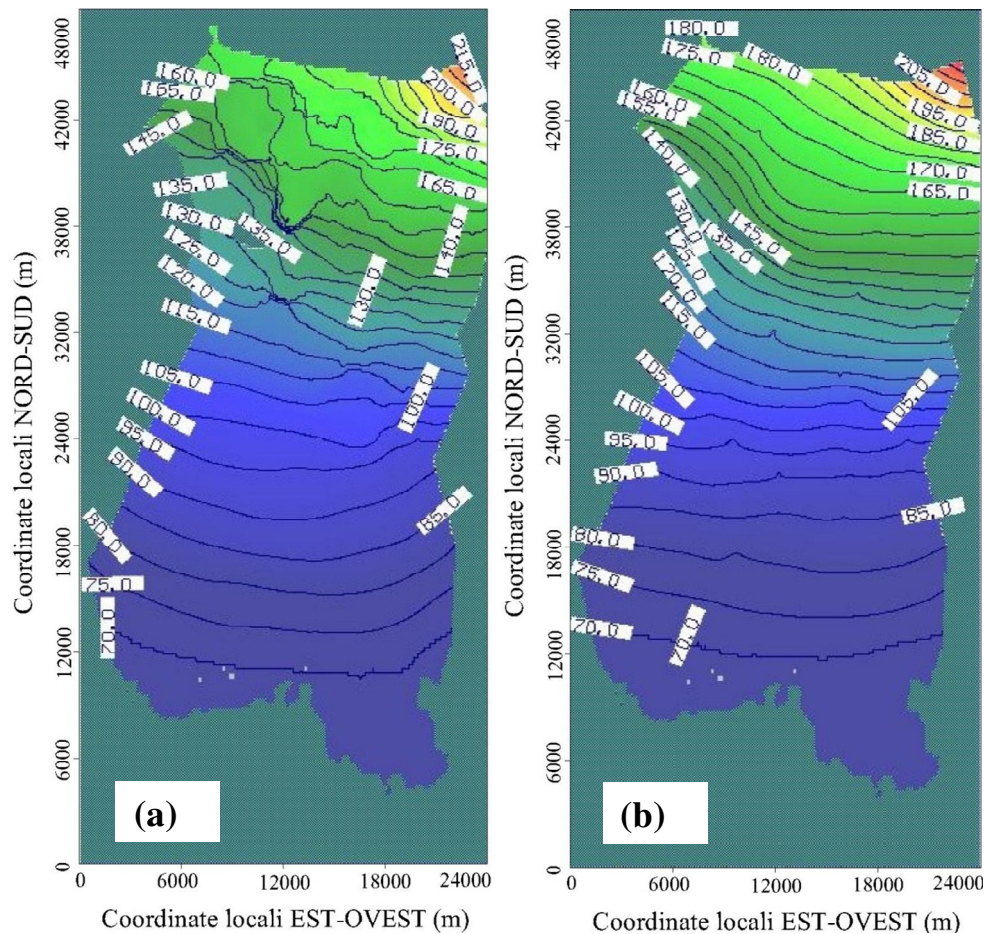


**Figura 7.6.1.5:** Sezione D-D (colonna 120) - distribuzione spaziale dei valori di conducibilità idraulica al termine del processo di calibrazione per il modello di mezzo composito (a) e per il modello a continui multipli (b)

Analizzando i risultati è possibile osservare che il modello a continui multipli fornisce un campo di permeabilità più omogeneo rispetto al modello di mezzo composito ed i valori si attestano intorno alle alte conduttività, con una media totale nell'ordine di  $10^{-3}$ .

### 7.6.2 Piezometria

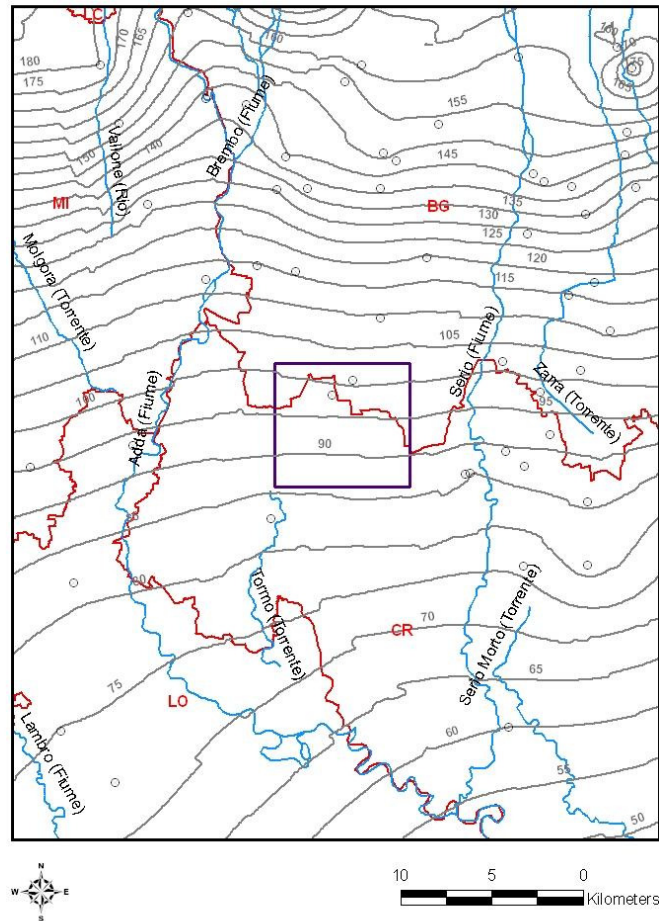
La *Figura 7.6.2.1* mostra il risultato della distribuzione dei carichi sulla base dei modelli calibrati.



**Figura 7.6.2.1:** Piezometrie calcolate per il modello di mezzo composito (a) e per il modello a continui multipli (b)

È possibile osservare, dai risultati ottenuti in termini di carichi piezometrici, come il modello a continui multipli mostri una maggiore regolarità della distribuzione spaziale dei carichi rispetto al modello di mezzo composito. Questo è una diretta conseguenza delle diverse tipologie di campi di permeabilità stimati per i due casi. Il modello di mezzo composito presenta una più elevata eterogeneità rispetto al secondo e una conseguente maggiore irregolarità nell'andamento del carico piezometrico, soprattutto nella zona dove anche la geometria del modello concettuale è molto complessa.

La *Figura 7.6.2.2* mostra la ricostruzione della distribuzione dei carichi relativi alla media annua del periodo 2001 – 2006 ottenuta tramite interpolazione dei dati sperimentali.

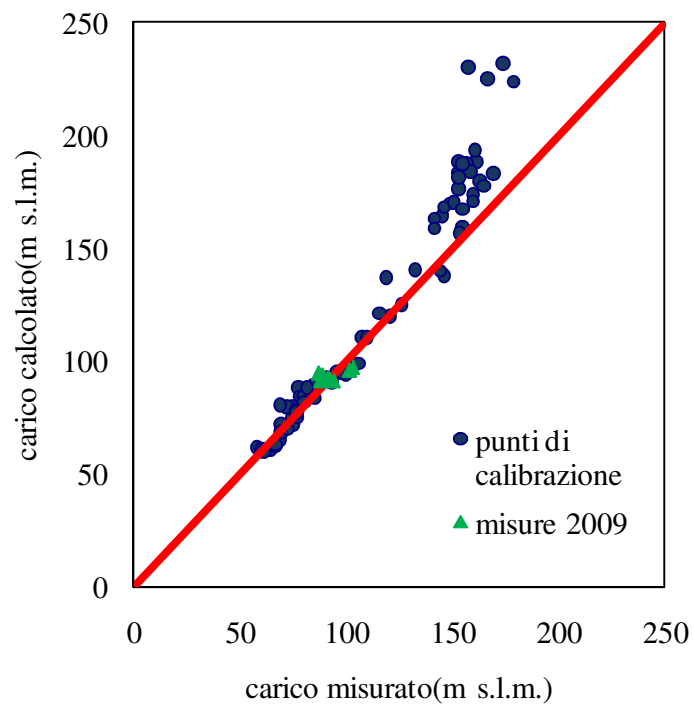


**Figura 7.6.2.2:** Carta Piezometrica – Media Annua del periodo 2001-2006

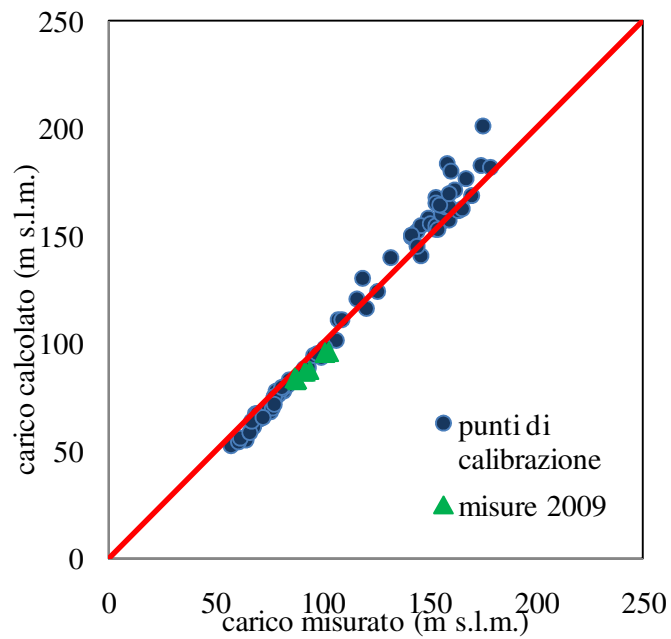
Si osserva che, qualitativamente, l'andamento dei carichi stimati per entrambi i metodi risulta congruente alla piezometria interpolata per il periodo 2001 – 2006.

Le Figure 7.6.2.3 e 7.6.2.4 presentano il confronto tra i valori di carico piezometrico osservati e calcolati per il modello di mezzo composito e a continui multipli rispettivamente.

I valori simulati, inoltre, sono stati confrontati con i valori misurati sperimentalmente in corrispondenza della rete piezometrica di controllo di nuova installazione.



**Figura 7.6.2.3:** Confronto tra i carichi stimati attraverso il modello di mezzo composito, carichi misurati utilizzati per il processo di calibrazione e carichi misurati all'interno della rete di nuova installazione

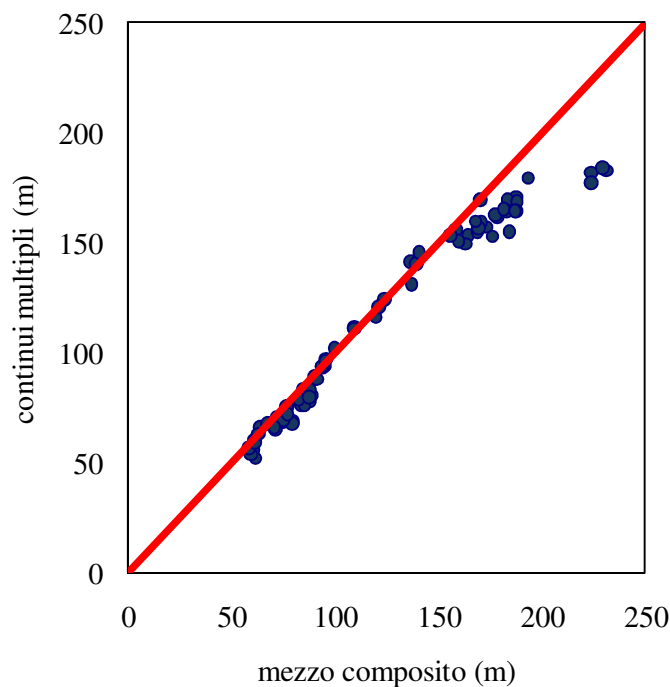


**Figura 7.6.2.4:** Confronto tra i carichi stimati attraverso il modello continui multipli, carichi misurati utilizzati per il processo di calibrazione e carichi misurati all'interno della rete di nuova installazione

Si osserva che, in entrambi i casi, gli errori più elevati si registrano in corrispondenza del settore Nord dell'area del *modello a grande scala* dove il carico calcolato dal modello è sovrastimato rispetto al carico misurato. Il modello a continui multipli presenta scostamenti generalmente inferiori.

Si è inoltre analizzata la sensitività del modello alla tipologia di condizioni al contorno, con particolare riferimento alla condizione di flusso assegnato al limite di monte e al livello di carico imposto in corrispondenza dei corsi d'acqua. I risultati non sono particolarmente sensibili, nell'area di interesse, alla condizione al contorno.

Per completezza, si presenta, in *Figura 7.6.2.5*, il confronto tra i carichi simulati per i due differenti modelli utilizzati per la ricostruzione del campo di conducibilità idraulica.



**Figura 7.6.2.5:** Confronto tra i carichi stimati attraverso il modello di mezzo composito e il modello a continui multipli



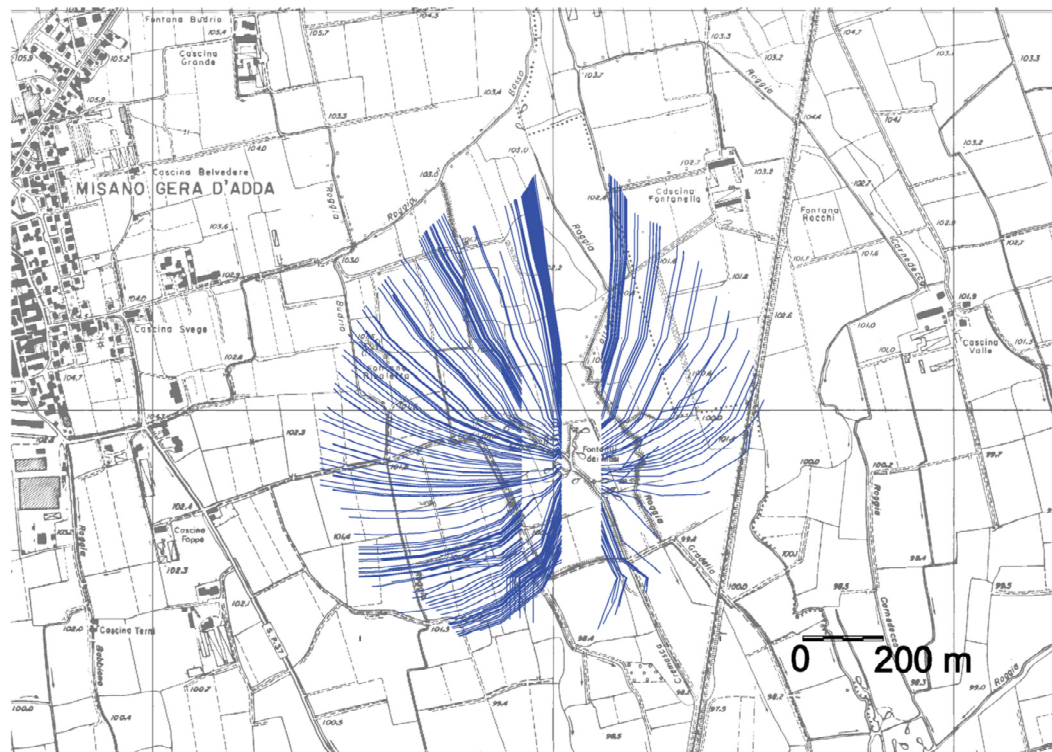
## 7.7 Implementazione del modello numerico per una valutazione preliminare delle aree di salvaguardia dei fontanili

Sulla base dei modelli numerici implementati e calibrati come descritto in precedenza, sono state ricostruite, tramite una procedura di backward particle tracking, le linee di flusso di particelle immesse all'interno del campo di moto in corrispondenza dei fontanili Misana Quarantina e Acquarossa e perimetrare le aree relative alle isocrone 365 giorni e 10 anni.

Il tracciamento è stato eseguito utilizzando l'applicazione *ModPath*.

La dispersività è stata fissata pari a 10 metri, mentre per la porosità si è adottato un valore uniforme e pari a 0.3.

A titolo di esempio, la *Figura 7.7.1* mostra le linee di flusso relative all'isocrona 365 giorni in corrispondenza del fontanile Misana.



**Figura 7.7:** Traiettorie relative al tempo  $t = 365$  g.