

Indagini di campo e studi modellistici finalizzati a valutare l'influenza delle eterogeneità di un sistema acquifero multistrato sulla progettazione di un intervento di bonifica delle acque

Field and modeling studies of aquifer heterogeneity to improve remediation planning in a multilayered aquifer system

A.Gigliuto, C.Righetti, R. Vaccari, L.Moretti

Riassunto: L'articolo presenta gli studi svolti nell'ambito degli interventi di bonifica di un sito costiero contaminato, volti a delineare la presenza e la natura delle eterogeneità di un complesso sistema idrogeologico. Scopo del lavoro è stato, in particolare, l'individuazione dell'influenza delle eterogeneità idrogeologiche sulla migrazione del *plume* di contaminazione da solventi clorurati (CAHs), al fine di indirizzare le strategie di bonifica.

L'idrogeologia dell'area è contraddistinta dalla presenza di un acquifero multistrato caratterizzato da uno stretto rapporto tra acque sotterranee e superficiali (fluttuazioni di marea, sistema lacustre superficiale). Il sistema è stato studiato sia attraverso indagini di campo che attraverso studi di modellistica nume-

rica del flusso idrico sotterraneo. Le indagini di campo hanno incluso monitoraggio piezometrici in continuo, l'installazione ed il campionamento di piezometri multilivello e l'integrazione della rete piezometrica esistente con lo scopo di definire al meglio sia la distribuzione orizzontale che verticale della contaminazione. La complessità del sistema idrogeologico ha reso anche necessaria l'esecuzione di prove idrauliche e di test con traccianti, al fine di valutare le interazioni idrauliche tra gli acquiferi presenti e il loro rapporto con le acque superficiali. Gli studi modellistici hanno incluso la realizzazione di 3 distinti modelli numerici del flusso di falda volti a verificare l'efficacia delle azioni di messa in sicurezza di emergenza attuate in passato, ottimizzare i sistemi e supportare le strategie di bonifica delle future fasi progettuali. Gli studi svolti hanno permesso di delineare una migrazione verticale del *plume* di contaminazione, dovuta sia alla presenza di gradienti idraulici legati all'interazione con il sistema lacustre superficiale che alla complessità e stratificazione degli acquiferi.

Parole chiave: acquiferi costieri, contaminazione, eterogeneità, modellazione numerica, relazioni acque sotterranee/superficiali, test con traccianti

Keywords: *coastal aquifers, contamination, heterogeneities, numerical modeling, groundwater/surface-water relations, tracer tests.*

Andrea GIGLIUTO ✉
AECOM Italy S.r.l.
Via Francesco Ferrucci 17/A, Milan, Italy
tel. 023180771 - fax. 0234537410
andrea.gigliuto@aecom.com

Chiara RIGHETTI
Roberta VACCARI
Leandro MORETTI
AECOM Italy S.r.l.
Via Francesco Ferrucci 17/A, Milan, Italy

Chiara RIGHETTI
chiara.righetti@aecom.com

Roberta VACCARI
roberta.vaccari@aecom.com

Leandro MORETTI
leandro.moretti@aecom.com

Ricevuto: 24 luglio 2012 / Accettato: 4 settembre 2012
Pubblicato online: 30 settembre 2012

© Associazione Acque Sotterranee 2012

Abstract: *This paper presents the work carried out at a coastal contaminated site to define the presence and nature of heterogeneities in a complex hydrogeological aquifer system. The aim of the studies was to identify the effects of aquifer heterogeneities affecting plume migration in order to support remediation strategies. The hydrogeology of the area is characterized by the presence of a multilayer aquifer and a close relationship between groundwater and surface water (tidal fluctuations, lake system). Different approaches were utilized to investigate the system, including field and modeling studies. Field investigations included continuous groundwater level monitoring system, the monitoring of multi-level wells and the installation and sampling of new monitoring wells in order to define the vertical distribution of the chlorinated solvents (CAHs) contamination. The complexity of the hydrogeological system required hydraulic tests and tracers tests in order to verify the hydraulic interactions between aquifer layers and their relationship with surface water. The modeling studies have included the implementation of 3 separate numerical models of groundwater flow, aiming to verify the effectiveness of the previous site emergency remedial actions and to support remediation strategies in different project phases. The studies allowed to understand the downward plume migration of the CAHs: vertical hydraulic gradients induced by the surface water system and the complexity of the multilayered aquifer system due to presence of heterogeneities mainly affected the CAHs transport in the first aquifer.*

Introduzione

Il presente articolo illustra la metodologia di studio di un sito contaminato costiero caratterizzato da un complesso sistema idrogeologico e influenzato da una stretta relazione tra acque sotterranee e superficiali (mare e lago costiero). Le diverse fasi di indagini di caratterizzazione del sito hanno evidenziato la presenza di un'area sorgente con presenza di idrocarburi alifatici clorurati in prossimità della linea di costa e di un *plume* di contaminazione delle acque di falda verso la zona del lago costiero. Il sito è stato oggetto di intervento di messa in sicurezza tramite l'installazione di un sistema di pump&treat in prossimità del lago.

Le indagini di campo, realizzate in varie fasi di approfondimento, hanno messo in luce la presenza di un sistema idrogeologico complesso, sia per la presenza di un acquifero multistrato eterogeneo, sia per la presenza di elementi fisici ed idrogeologici al contorno che influenzano il sistema (linea di costa, oscillazioni di marea, lago).

Da qui la necessità di effettuare uno studio più approfondito per caratterizzare il complesso sistema acquifero ed in particolare studiare le eterogeneità e la loro influenza nei processi di trasporto dei contaminanti in falda. Viene affrontata, quindi, la problematica della caratterizzazione degli acquiferi complessi e dell'influenza delle eterogeneità sul flusso delle acque di falda e del conseguente trasporto di inquinanti. Come è noto, infatti, la presenza di eterogeneità nelle formazioni idrogeologiche, determina il deflusso di contaminanti attraverso le porzioni dell'acquifero dotate di maggiore trasmissività (Bear, 1992; Beretta, 1992; Chiesa G., 1994; Francani, 2008).

Lo studio presenta alcuni dei diversi metodi di indagine e di analisi utilizzati per valutare la presenza e il ruolo che hanno le eterogeneità del sistema idrogeologico in esame.

La sinergia tra test di campo e studi modellistici ha permesso, infatti, di evidenziare e studiare gli effetti della presenza di eterogeneità del sistema che comportano la necessità di affinare gli studi progettuali, al fine di dimensionare in modo maggiormente mirato i sistemi di messa in sicurezza e bonifica delle acque sotterranee.

Inquadramento geologico-idrogeologico del sito.

Il sottosuolo dell'area su cui insiste il sito è caratterizzato da una successione stratigrafica potente varie centinaia di metri, fondamentalmente di origine marina (costiero) e transizionale (palustre). Le basse energie cinetiche offerte dalle acque degli ambienti marino e soprattutto transizionale hanno consentito il deposito delle classi granulometriche più fini, quali sabbie, limi ed argille. Pertanto il sottosuolo è caratterizzato da un'alternanza di orizzonti a granulometria sabbiosa (da sabbie medie a sabbie fini, a sabbie limose) ed orizzonti a granulometria predominante limosa o argillosa.

In generale predominano le sabbie limose ed i limi sabbiosi, con intercalati orizzonti limoso-argillosi che assumono spesso una configurazione lenticolare racchiusa all'interno della serie sabbioso limosa. Le alternanze di orizzonti sabbiosi e orizzonti limoso – argillosi offrono alla circolazione idrica sotterranea

numerosi contrasti di permeabilità necessari alla strutturazione di acquiferi sovrapposti.

L'idrogeologia del sito è caratterizzata dalla presenza di un acquifero multistrato costituito, nella parte sommitale, da due orizzonti acquiferi suddivisi da un livello argilloso. In particolare si riscontra un acquifero freatico superficiale sabbioso di circa 10-15 m di spessore, caratterizzato da una soggiacenza di circa 1,5 m dal piano campagna, sovrapposto ad un acquifero limoso-sabbioso di spessore superiore a 10 m, il cui livello statico è superiore al livello dell'acquifero superficiale.

Dal punto di vista idrogeologico, la struttura acquifera in oggetto può essere interpretata come un acquifero multistrato imperfetto, con locali comportamenti di monostrato frazionato. Ciò determina il fatto che i vari livelli a granulometria più grossolana, acquiferi, sono sostanzialmente intercomunicanti, con differenti livelli di intercomunicazione in funzione delle permeabilità degli orizzonti impermeabili o semipermeabili sottostanti e soprastanti.

Come spesso accade in contesti idrogeologici analoghi, i comportamenti idrodinamici variano con la profondità, da un freatismo netto nei livelli acquiferi più superficiali, ad un semifreatismo (drenaggio differito) o ad un semiartesianesimo negli orizzonti immediatamente sottostanti.

Il flusso delle acque sotterranee nella zona è, inoltre, fortemente influenzato dalla vicinanza della linea di costa, e dalle relative oscillazioni di marea, e dalla presenza di un lago costiero artificialmente mantenuto ad una quota inferiore al livello marino. La presenza di questi importanti elementi idrologici ha una diretta influenza sulla direzioni di deflusso idrico e sui gradienti idraulici del sito. Questi ultimi risultano molto variabili in relazione alle variazioni delle condizioni al contorno (oscillazioni di marea, livello del lago).

L'ipotetica sorgente di contaminazione dell'acquifero è stata individuata in un esteso livello di terreni contaminati da solventi clorurati presenti in prossimità della linea di costa. Le indagini di caratterizzazione hanno evidenziato che la contaminazione da solventi clorurati si estende dal piano campagna, sino ad una quota massima di 4 m di profondità in alcune zone. La contaminazione a carico delle acque di falda interessa principalmente il primo acquifero nell'area compresa tra la zona sorgente ed il lago.

Attualmente nel sito è presente una barriera idraulica di emungimento delle acque sotterranee a protezione del deflusso verso il lago costiero.

Materiali e metodi

La valutazione della presenza di eventuali eterogeneità del sistema acquifero è stata effettuata tramite la realizzazione di indagini e prove sul campo, e supportata dagli studi modellistici. Tali studi hanno permesso di effettuare una prima valutazione circa l'impatto indotto dalle eterogeneità del sistema in esame sul trasporto dei contaminanti presenti.

Indagini di campo

La rete piezometrica, precedentemente realizzata per il monitoraggio dei livelli di falda e delle concentrazioni dei conta-

minanti presenti, è stata incrementata numericamente al fine di ottenere una migliore rappresentazione del sistema idrogeologico e della distribuzione areale dei contaminanti (Fig. 1). I piezometri sono stati completati dall'installazione di un fitto sistema di monitoraggio in continuo dei livelli piezometrici volto alla registrazione delle oscillazioni del livello saturo in funzione degli andamenti di marea e delle variazioni del livello del lago costiero.

Al fine di valutare la distribuzione verticale della contaminazione nella falda acquifera superficiale, sono stati installati alcuni sistemi di monitoraggio multilivello costruiti mediante l'installazione di cinque piezometri di piccolo diametro (1,5 pollici), con diversa profondità e fenestrazione, in un unico foro di perforazione. Le separazioni intermedie tra un piezometro e l'altro sono state realizzate inserendo dei setti impermeabili di 0,5 m di spessore, costituiti da argilla bentonitica.

Una volta terminata l'installazione, sono state campionate le acque sotterranee dai singoli micro piezometri del sistema multilivello, attraverso il metodo a basso flusso (*low-flow purging*). I campioni sono stati sottoposti ad analisi chimiche di laboratorio per la ricerca dei solventi clorurati.

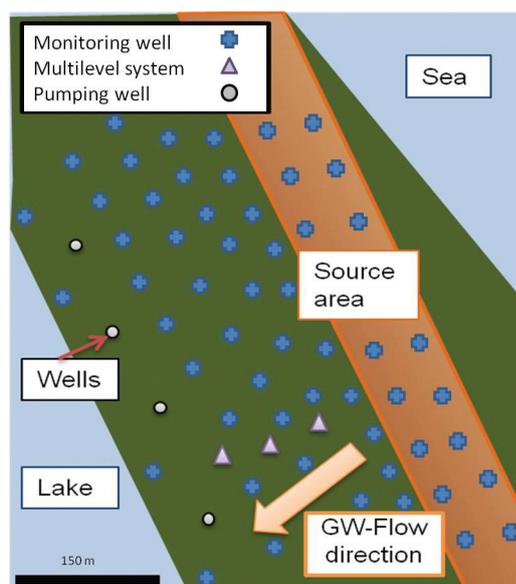


Fig. 1 - Area di studio con ubicazione dei pozzi, piezometri e piezometri multilivello.

Fig. 1 - Site description with wells, monitoring wells and multilevel monitoring wells position.

Per valutare la complessità del sistema idrogeologico sono stati eseguiti studi di parametrizzazione idraulica degli acquiferi volti alla definizione della distribuzione spaziale dei parametri idrogeologici ed alla valutazione del comportamento idrodinamico dell'acquifero. In particolare sono stati realizzati test idraulici e test con traccianti di seguito descritti.

Preliminarmente ai test con traccianti artificiali è stata condotta una campagna di prove idrogeologiche comprendenti *slug test* e prove di emungimento a gradini e di lunga durata.

Gli studi di parametrizzazione idraulica degli acquiferi sono stati eseguiti in diversi piezometri di monitoraggio, spazialmente distribuiti sul sito, al fine di definire la conducibilità idraulica del primo e del secondo acquifero e verificare la presenza di eterogeneità dei parametri idrogeologici nella zona in cui è presente il *plume* di contaminazione.

In particolare, sono stati eseguiti alcuni *slug test* in corrispondenza di 12 piezometri. I test sono stati eseguiti tramite l'immissione e l'estrazione repentina di un cilindro di materiale plastico, appositamente appesantito con sabbia e ghiaia e la misurazione rispettivamente degli innalzamenti e degli abbassamenti del livello nel piezometro di prova mediante *datalogger*. Le prove sono state interpretate tramite l'algoritmo risolutivo di Bower e Rice (1976) per ricavare i valori di conducibilità idraulica.

Le prove a gradini e di lunga durata sono state eseguite in alcuni pozzi della barriera idraulica, valutando gli abbassamenti nei piezometri vicini. La misurazione dei livelli nei punti di prova e nei piezometri vicini è avvenuta sia manualmente, mediante sonda freaticometrica, che in modo automatico, mediante trasduttori di pressione abbinati a *datalogger* (frequenze di acquisizione scelte in funzione del test). Al termine delle prove a gradini è stata monitorata anche la risalita nei pozzi. Le prove di lunga durata e le curve di risalita dei livelli nei pozzi hanno permesso di ottenere una stima dei valori dei parametri caratteristici dell'acquifero (Neuman, 1972 e 1975; Boulton, 1963; Hantush e Jacob, 1955; Theis, 1935). Ulteriori prove a gradini e di lunga durata sono state eseguite anche nei piezometri del secondo acquifero.

La campagna di test con traccianti artificiali è stata progettata al fine di ottenere molteplici informazioni circa l'assetto idrogeologico e idrodispersivo del sito. I test con traccianti sono stati realizzati allo scopo di definire:

- i rapporti tra falda superficiale e profonda
- la velocità di deflusso della falda superficiale e gli scambi acquifero/lago
- i parametri idrodispersivi dell'acquifero superficiale
- l'efficacia dei sistemi di messa in sicurezza e la verifica delle simulazioni previsionali modellistiche

I test con traccianti sono stati eseguiti utilizzando sia fluoresceina che rodamina, traccianti fluorescenti atossici (Leibundgut H.S., 1997; Smart P.L., 1982) allestendo appositi campi prova ed effettuando sia test attivi che passivi. Il monitoraggio dei test è stato condotto utilizzando spettrofluorimetri da campo e fluorocaptori. L'interpretazione dei test è stata effettuata analizzando le curve di restituzione del tracciante ricavate dagli spettrofluorimetri e dall'analisi qualitativo-visiva dei fluorocaptori (Parriaux A. et al., 1988; Uggeri A., Vigna B., 1997).

Per quanto riguarda il collegamento acquifero superficiale/profondo sono stati eseguiti due test differenti: il primo è stato eseguito iniettando fluoresceina nell'acquifero superficiale e pompando dalla falda profonda. Il secondo test è stato condotto in modo inverso iniettando fluoresceina nella falda profonda e pompando dalla falda superficiale (Fig. 2).

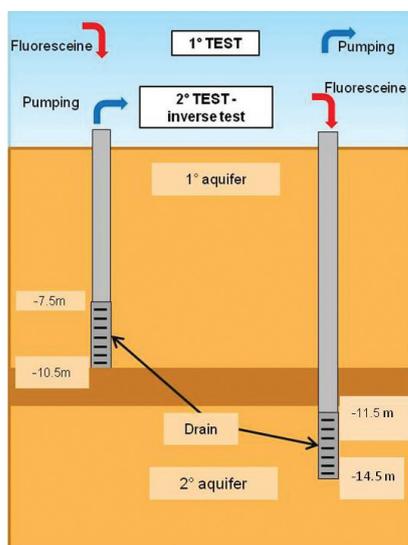


Fig. 2 - Struttura dei piezometri utilizzati per uno dei test con traccianti.

Fig. 2 - Tracer tests monitoring wells.

L'iniezione di un tracciante in un piezometro prossimo al lago e la rilevazione dello stesso attraverso il monitoraggio delle acque lacustri ha permesso di evidenziare la velocità di deflusso dell'acquifero lungo l'interfaccia falda/lago.

Da ultimo è stato realizzato un test finalizzato alla definizione della zona di cattura dei pozzi di pompaggio, attraverso l'iniezione di tracciante a monte dei pozzi e la valutazione della loro comparsa (mediante spettrofluorimetri) sia nei pozzi in pompaggio che nei piezometri a valle e nel lago (Fig. 3).

Al fine di verificare le condizioni idrogeologiche al contorno durante i test idraulici, sono stati installati trasduttori di pressione abbinati a *datalogger* per il monitoraggio in continuo dei livelli idrici del mare (oscillazioni di marea) e del lago costiero.

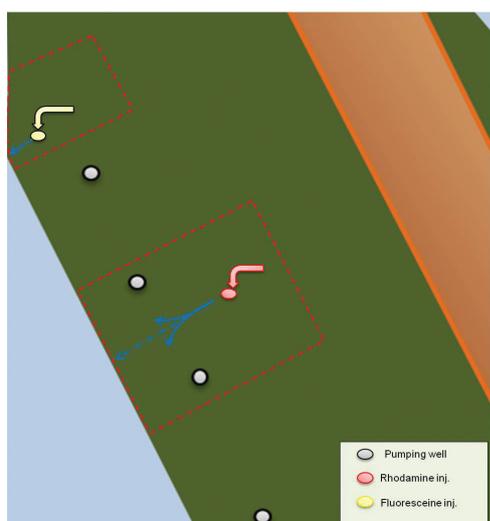


Fig. 3 - Struttura dei piezometri utilizzati per uno dei test con traccianti.

Fig. 3 - Tracer tests monitoring wells.

Studi modellistici

Per comprendere la dinamica del sistema acquifero, parallelamente alle indagini di campo descritte precedentemente, sono stati condotti studi modellistici a supporto della verifica degli interventi di messa in sicurezza esistenti, della valutazione dell'assetto idrogeologico presente e della progettazione dei futuri interventi di bonifica.

In particolare, sono stati implementati tre diversi modelli idrogeologici, eseguiti in fasi successive in relazione ai risultati derivanti dagli approfondimenti conoscitivi riguardanti il sito: il primo modello è stato implementato utilizzando il codice di calcolo alle differenze finite MODFLOW (USGS, 2000; USGS, 2005), mentre il secondo e il terzo sono stati realizzati attraverso il codice di calcolo agli elementi finiti FE-FLOW® (Diersch, 2002).

Il primo modello di flusso è stato realizzato in 3-D in stato stazionario, il secondo modello di flusso in 3-D è stato realizzato in stato transitorio, mentre il terzo modello costituisce un modello di flusso (stazionario) e di trasporto di contaminanti (transitorio) lungo una sezione 2-D diretta parallelamente al flusso di falda, lungo il *plume* di contaminazione (Tab. 1).

Rispetto al primo modello, sviluppato alle differenze finite, si è optato per costruire il secondo modello agli elementi finiti, per la migliore adattabilità della griglia (costituita da nodi e triangoli) agli elementi presenti in sito quali i bordi del lago e la linea di costa, oltre ad una buona capacità di simulazione di sistemi idrogeologici complessi.

Il terzo modello di flusso e trasporto di contaminanti in falda rappresenta lo stadio preliminare per successivi approfondimenti. Infatti, è stato scelto di condurre tale simulazione considerando con maggior dettaglio le eterogeneità stratigrafiche presenti (lenti argillose). In questo modo è stato possibile ottenere informazioni sulla distribuzione verticale della contaminazione in falda in presenza delle eterogeneità che caratterizzano il complesso sistema idrogeologico oggetto di studio. Implementazioni successive di tale lavoro saranno volte a introdurre maggior complessità al sistema attraverso l'introduzione della variabile tempo alle condizioni al contorno per poi arrivare a realizzare un modello 3-D di flusso e trasporto di contaminanti in falda in stato transitorio, caratterizzato dalla complessa variazione di conducibilità idraulica presente nell'acquifero e dalla variazione dei carichi idraulici nel tempo (marea).

Primo Modello Numerico (MODFLOW-200x)

Tale modello di flusso è stato realizzato in stato stazionario al fine di valutare, in via preliminare, la potenziale efficacia dei sistemi di messa in sicurezza esistenti.

Il flusso delle acque sotterranee è stato simulato utilizzando il codice di calcolo alle differenze finite MODFLOW (Harbaugh et al., 2000), in combinazione con MODPATH (Pollock, 1994), per la simulazione delle linee di flusso. Il modello è stato implementato utilizzando l'interfaccia grafica Groundwater Vistas® (Environmental Simulations). Tale codice risolve attraverso una serie di approssimazioni alle

Tab. 1 - Modelli di flusso realizzati presso il sito sottoposto ad indaginei

Tab. 1 - Numerical models created for the site.

2D/3D	Code	Type	Time dependent hydraulic head	Transport
3D	MODFLOW [®]	Steady-state	NO	NO
3D	FEFLOW [®]	Transient-state	YES	NO
2D	FEFLOW [®]	Steady flow- Transient transport	NO	YES

differenze finite la seguente equazione del flusso idrico (che governa la variazione di carico idraulico nel tempo rispetto ai gradienti ed alle conducibilità idrauliche):

$$\frac{\partial \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right)}{\partial z} - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Dove:

- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} sono valori della conducibilità idraulica lungo la x , y e z ;
- h è l'altezza piezometrica;
- W è il flusso per unità di volume e rappresenta le condizioni al contorno (ingressi e uscite);
- S_s è il coefficiente di immagazzinamento;
- t è il tempo.

Il modello si estende su una superficie di circa 3 milioni di m^2 . La dimensione delle celle scelta è variabile da 50 m, nella porzione distale dall'area di interesse, a circa 6 m in corrispondenza dell'area sorgente. Verticalmente la griglia del modello include 8 *layers*, strutturati in base allo schema stratigrafico ed al modello concettuale del sito, ovvero i primi 4 *layers* per rappresentare l'acquifero superficiale, 1 *layer* per l'orizzonte di separazione tra il primo ed il secondo acquifero, che è stato rappresentato con 2 *layers*, mentre l'ultimo *layer* per la base del secondo acquifero.

Sono stati assegnati valori costanti di conducibilità idraulica alle due falde acquifere e allo strato argilloso di separazione.

Le condizioni al contorno sono state assegnate sulla base delle caratteristiche idrogeologiche del sito e dell'idrografia delle acque superficiali (Fig. 4).

I limiti idrodinamici del modello sono: il mare, il lago, i pozzi in pompaggio della barriera idraulica. Di seguito vengono schematizzate le condizioni al contorno (Anderson M., Woessner M., 1992) utilizzate nel modello di flusso (Tab. 2). Sono state utilizzate 2 tipologie di condizioni al contorno,

come di seguito specificato:

- condizione a carico imposto o di primo tipo (Dirichlet): è stato assegnato un valore costante del carico idraulico al mare ed al lago costiero;
- condizione a flusso imposto o di secondo tipo (Neumann): è stata assegnato un flusso costante ai pozzi in pompaggio ed una ricarica superficiale.

La ricarica superficiale è stata stimata partendo dal valore delle precipitazioni medie annue e calcolata utilizzando la formula di Connor (1997).

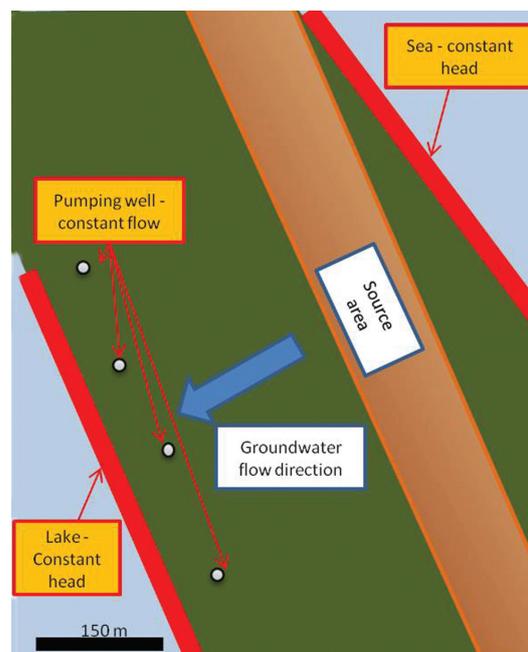


Fig. 4 - Condizioni al contorno del modello numerico di flusso.

Fig. 4 - Boundary conditions of the numerical model.

Tab. 2 - Primo Modello di flusso: Condizioni al contorno.

Tab. 2 - Boundary conditions of the first model.

Element	Type of boundary condition	Packet
Sea	Tipo 1 -Dirichlet condition	Constant Head
Lake	Tipo 1 -Dirichlet condition	Constant Head
Pumping wells	Tipo 2 – Neumann condition	Constant flow - Well

Dal momento che il modello è stato implementato in stato stazionario, per valutare gli effetti indotti sull'acquifero dalle variazioni del livello del mare, sono stati condotti vari scenari di simulazione caratterizzati da differenti livelli di carico idraulico delle condizioni al contorno (livelli di marea).

Calibrazione ed analisi di sensitività

E' stata eseguita un'analisi di sensitività (Hill et al., 2000; Hill & Tiedeman, 2007) sui parametri idrogeologici che presentano margini di incertezza e variabilità ed in particolare per il caso in esame sulla conducibilità idraulica degli acquiferi e sull'infiltrazione efficace. A tale scopo si è proceduto alla variazione della conducibilità idraulica degli acquiferi e dell'infiltrazione efficace, al fine di individuare i parametri che maggiormente influenzano il valore dei carichi idraulici; a seguito di tale analisi è stato possibile evidenziare la marcata influenza data dal valore di conducibilità idrauliche degli acquiferi sul risultato della simulazione.

La calibrazione del modello è stata effettuata attraverso la variazione manuale dei parametri, (metodo *trial & error* secondo Spitz & Moreno, 1996). La calibrazione è stata eseguita riferendosi ai dati piezometrici rilevati tramite *dataloggers* (circa 10 piezometri) in un preciso istante, in condizioni medie di livello del mare e del lago costiero.

Per la calibrazione dell'acquifero superficiale è stato individuato come obiettivo in valore assoluto dei residui un valore inferiore a 5 cm, mentre per il secondo acquifero è stato impostato un obiettivo inferiore a 30 cm.

La validazione è stata effettuata utilizzando i dati piezometrici statici risalenti ad una situazione idrodinamica differente rispetto a quella di calibrazione.

Secondo Modello Numerico (FEFLOW)

Il secondo modello numerico di flusso 3-D è stato realizzato in stato transitorio utilizzando il codice di calcolo ad elementi finiti FEFLOW® (Diersch, 2002), al fine di studiare il complesso rapporto tra acque superficiali e sotterranee, caratterizzato da variazioni dei livelli idraulici nel tempo.

Tale modello è stato implementato al fine di ottenere ulteriori risposte sfruttando le possibilità di adattamento della griglia al dominio di studio utilizzando i risultati delle indagini eseguite successivamente alla realizzazione del primo modello.

La simulazione del flusso idrico delle acque sotterranee è stata eseguita in regime transitorio sulla base delle piezometrie inerenti un periodo della durata di 5 giorni.

La discretizzazione della griglia di calcolo, la distribuzione delle proprietà idrodinamiche, l'assegnazione delle condizioni al contorno si basano sugli studi idrogeologici precedenti e sulle valutazioni effettuate attraverso il primo modello idrogeologico implementato per il sito. La discretizzazione orizzontale della griglia è stata fatta assegnando un dettaglio crescente agli elementi all'interno del confine del sito, al lago costiero e ai pozzi presenti. In prossimità del lago costiero si è operato un raffittimento degli elementi fino a dimensioni di 15 m. In corrispondenza del sito la dimensione degli elementi è di circa 5-7 m, fitta ancor più discreti in corrispondenza dei pozzi (circa 3 m). La discretizzazione verticale, caratterizzata da 10 layers, è stata ottenuta introducendo le superfici limite relative al modello stratigrafico locale.

I valori di conducibilità idraulica del primo acquifero (Tab. 3) sono ottenuti dall'interpolazione dei dati ricavati

Tab. 3 - Secondo Modello di flusso: Parametri di input.

Tab. 3 - Input parameters of the Second Model.

Input parameters	Stratigraphic horizon	Value
Horizontal hydraulic conductivity	First Acquifer	Range: 5.7E-05 - 8.7E-04 m/s
	Second Acquifer	6E-07 m/s
Horizontal hydraulic conductivity	Separation between first and second acquifer	Kx= 6E-07
Horizontal hydraulic conductivity	Base of the second acquifer	Kx= 1E-09.
Storage coefficient	First Acquifer	Ss= 1*10-4 [1/m Sy = 0.2

dai test idrogeologici effettuati in campo utilizzando l'inverso della distanza pesata come metodo di interpolazione. La conducibilità idraulica del secondo acquifero è stata assegnata utilizzando un valore costante pari a quello già utilizzato nel precedente modello. Ai livelli di separazione impermeabile presenti è stato assegnato un valore di conducibilità idraulica costante sulla base dei dati disponibili.

Nella seguente tabella vengono riportate le condizioni al contorno utilizzate nel modello di flusso (Tab.4). Rispetto alle condizioni del primo modello, in questo caso è stato variato

nel tempo il carico idraulico del livello del mare (carico costante dipendente dal tempo). La condizione di carico idraulico dipendente dal tempo si è resa necessaria per simulare l'oscillazione di marea che influenza le condizioni idrogeologiche del sito. Nel periodo scelto per la calibrazione del modello le precipitazioni sono assenti. Pertanto l'infiltrazione efficace è stata assegnata pari a 0 mm/giorno.

Le simulazioni sono state effettuate in stato transitorio al fine di valutare le complesse variazioni idrauliche e le interazioni tra acque superficiali e sotterranee nel sito.

Tab. 4 - Secondo Modello di flusso: Condizioni al contorno.

Tab. 4 - Boundary conditions of the second model.

Element	Type of boundary condition	Packet
Sea	Tipo 1 -Dirichlet condition	Constant head (Time-dependent function)
Lake	Tipo 1 -Dirichlet condition	Constant Head
Pumping wells	Tipo 2 - Neumann condition	Constant flow - Well

Calibrazione ed analisi di sensitività

E' stata eseguita l'analisi di sensitività sui parametri idrogeologici che presentano maggiori margini di incertezza e variabilità ed, in particolare: conducibilità idraulica dell'acquifero superficiale, conducibilità idraulica dello strato argilloso di separazione tra gli acquiferi ed immagazzinamento.

Per valutare la risposta del modello a tali variazioni sono stati scelti i piezometri di monitoraggio utilizzati per la ricostruzione delle piezometrie e, successivamente, come target di calibrazione.

La fase di calibrazione del modello è relativa a dati piezometrici registrati tramite *datalogger* (con frequenza di acquisizione dati di 5 minuti) nei piezometri installati in falda superficiale. E' stato quindi confrontato l'andamento dei livelli piezometrici reali e simulati nel periodo di tempo modellato. In questo intervallo di tempo, le statistiche di calibrazione sono state condotte in corrispondenza di 3 istanti temporali diversi, caratterizzati da un livello di marea basso, intermedio e alto.

Per il secondo acquifero, in assenza di dati di livello registrati in continuo in corrispondenza del periodo scelto per la simulazione, è stato condotto un confronto di verifica in un periodo temporale diverso, caratterizzato da differenti condizioni idrodinamiche (maggior escursione di marea e diverso livello idraulico del lago), ma comunque riproducibile dal punto di vista modellistico.

Terzo Modello Numerico (FEFLOW)

Il terzo modello numerico di flusso e di trasporto, è stato realizzato in 2-D, in regime di flusso stazionario e di trasporto in stato transitorio, utilizzando il codice agli elementi finiti FEFLOW® (Diersch, 2002). Il modello è stato eseguito lungo

una sezione parallela al flusso di falda, in corrispondenza di tre punti di monitoraggio multilivello, al fine di valutare su base modellistica l'influenza delle eterogeneità idrogeologiche sul trasporto dei contaminanti in falda, con particolare dettaglio sul primo acquifero. Come discusso in precedenza, considerando la complessità del sito e sulla base dei dati disponibili, è stato scelto di effettuare inizialmente una modellazione del trasporto in 2D anziché in 3D, che potrà essere oggetto di studi futuri.

La griglia di calcolo è caratterizzata da un elevato infittimento in corrispondenza del primo acquifero (0.5-1 m) e di 1-1.5 m in corrispondenza del secondo acquifero.

Sono stati assegnati valori di conducibilità idraulica alle due falde acquifere ed allo strato argilloso di separazione compatibili con le interpolazioni eseguite per il secondo modello; inoltre, sono state introdotte, in base alle evidenze di campo risultanti dalle indagini pregresse, delle lenti siltoso-argillose caratterizzate da bassi valori di conducibilità idraulica (Fig. 5)

Il flusso è stato simulato considerando il livello medio marino ed il livello del lago costiero, in modo da analizzare una condizione relativa all'assetto idrogeologico "medio" del sito. Di seguito vengono riportate le principali condizioni al contorno relative al flusso e al trasporto di contaminanti in falda (Tab. 5). Sia per il flusso che per il trasporto sono state utilizzate rispettivamente condizioni di carico idrico (per il mare ed il lago costiero) e di concentrazione costante

I risultati del modello di trasporto sono stati confrontati, dal punto di vista qualitativo, con le concentrazioni rilevate in corrispondenza dei piezometri multilivello ubicati lungo la sezione del modello.

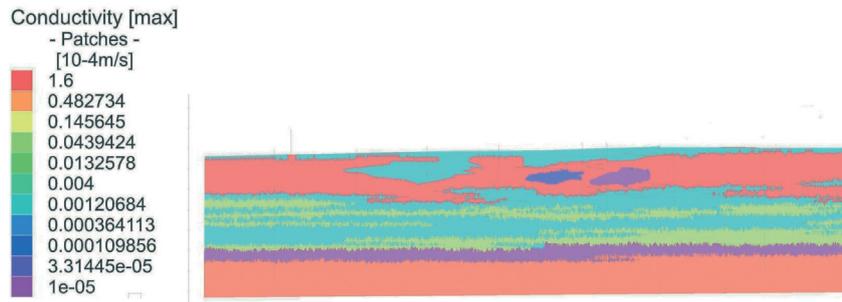


Fig. 5 - Valori di conducibilità idraulica lungo la sezione del modello 2D.
 Fig. 5 - Hydraulic conductivity distribution along the cross section of the 2D model.

Tab. 5 - Terzo Modello di flusso: Condizioni al contorno.
 Tab. 5 - Boundary conditions of the third model.

Element	Type of boundary condition/ transport parameters	Head value
Boundary conditions		
Sea	Constant Head	0 m asl
Lake	Constant Head	-2 m asl
Source area	Constant Concentration	Constant concentration
Transport parameters		
Aquifer	Longitudinal dispersivity	5 m
	Vertical dispersivity	0.5 m
Silty lenses	Longitudinal dispersivity	0.1 m
	Vertical dispersivity	0.1 m

Risultati

Risultati Indagini di campo.

I risultati dei prelievi selettivi dal sistema di monitoraggio multilivello sono stati rappresentati nella Figura 6 e correlati con il rispettivo intervallo di profondità dell'acquifero intercettato.

I risultati mostrano concentrazione elevate dei contaminanti a profondità intermedie nel primo acquifero in prossimità della zona sorgente di contaminazione, ed a profondità maggiori verso la zona più lontana del pennacchio.

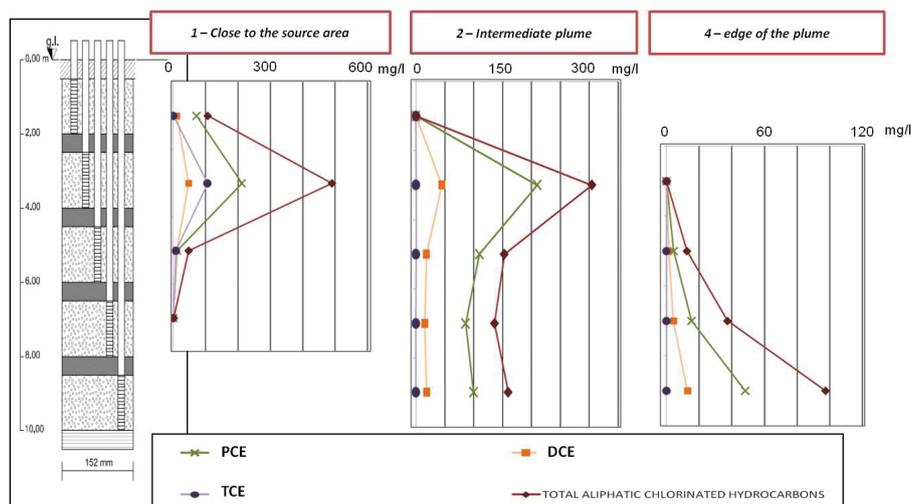


Fig. 6 - Risultati derivanti dai monitoraggi effettuati sui piezometri multilivello.
 Fig. 6 - Multilevels monitoring wells results.

Risultati test idraulici e test traccianti.

I test idraulici hanno permesso di determinare i parametri idraulici dell'acquifero che sono stati utilizzati per l'implementazione dei modelli numerici.

I test con traccianti hanno dimostrato la presenza di fuo-
resceina solo durante la prova inversa di pompaggio (secondo test), come si evidenzia nei risultati dei test in Figura 7.

L'analisi dei tempi di arrivo del tracciante nel lago costiero ha permesso di calcolare la velocità di deflusso della falda nella zona lungo il margine lacustre, e di comprendere la reale efficacia della barriera idraulica rispetto ai calcoli teorici: i risultati del test mostrano la rilevazione del tracciante anche nel lago, oltre che nei pozzi in pompaggio (Fig.8).

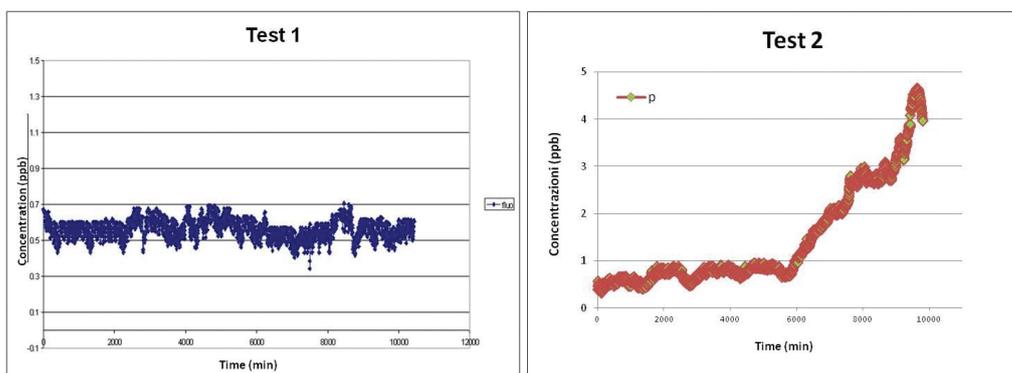


Fig. 7 - Risultati dei test con traccianti per valutare l'interconnessione tra i due acquiferi.

Fig. 7 - Tracers tests aquifers connection results.

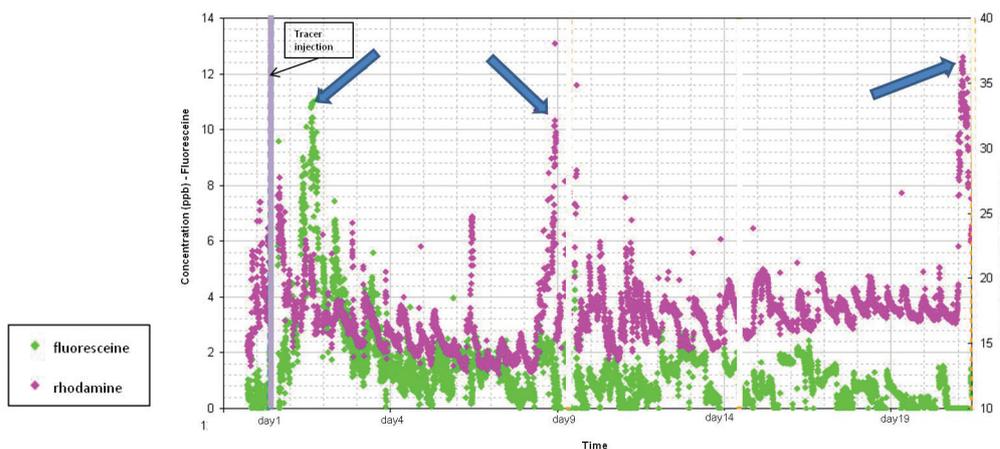


Fig. 8 - Risultati dei test con traccianti in prossimità della lago e della barriera idraulica.

Fig. 8 - Resulta from tracers tests near the lake and the hydraulic barrier.

Risultati studi modellistici - Primo Modello

In Figura 9 è rappresentato il grafico di confronto complessivo tra i valori osservati in campo e i valori calcolati dal modello. E' possibile osservare che solo un numero molto limitato di punti, ubicato in zone di minor interesse, si discosta dalla retta di calibrazione.

Tutti i target di calibrazione presentano residui compresi entro l'errore atteso, commisurato alla scarsità di informazioni disponibili in tale fase sugli acquiferi considerati.. Il modello è stato verificato anche in condizioni idrodinamiche diverse che hanno permesso di ritenerlo attendibile a scopi previsionali.

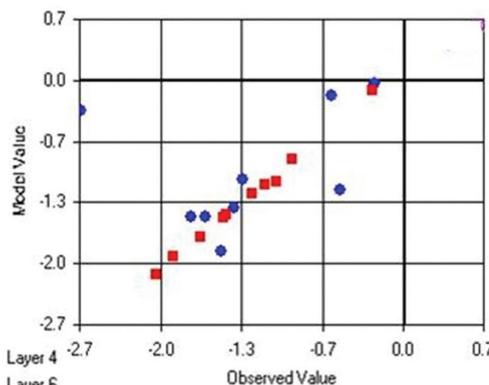


Fig. 9 - Relazione tra valori osservati di carico idraulico e valori calcolati dal primo modello.

Fig. 9 - Results from first model calibration: Observed vs simulated hydraulic head value.

Risultati Secondo Modello

Le simulazioni in transitorio del secondo modello sono state effettuate tenendo conto delle fluttuazioni del livello del mare: in Figura 10 si riporta il risultato della calibrazione in transitorio attraverso il confronto tra il carico idraulico simulato e reale, in corrispondenza dei punti di calibrazione ubicati nella prima falda.

Dall'analisi di sensitività è risultato che il parametro che determina le maggiori variazioni dei carichi piezometrici è la conducibilità idraulica del primo acquifero.

Di seguito sono riportate le statistiche di calibrazione osservate in corrispondenza di alcuni istanti temporali (Tab. 6) caratterizzati da differenti livelli di marea (con livello di marea basso, intermedio e alto).

I valori dei residui in valore assoluto risultano inferiori a circa 15 cm, con eccezione di un unico punto di calibrazione. Lo *standard error* della stima, la media dei residui in valore as-

soluto ed il coefficiente di correlazione indicano che il modello risulta calibrato rispetto ai carichi. Il valore di Normalized RMS ottenuto, inferiore al 10%, consente di considerare affidabile e utilizzabile il modello numerico.

Per quanto riguarda il secondo acquifero, nonostante le differenze riscontrate nel livello del lago e nell'andamento del livello del mare, i piezometri fenestrati nel secondo acquifero sono caratterizzati da valori di *residuals* in valore assoluto in genere inferiori a 30 cm; solo alcuni punti di monitoraggio presentano discrepanze attorno a 50 cm o maggiori.

Alla luce dei suddetti risultati di calibrazione, il secondo modello numerico, elaborato a seguito dei risultati provenienti dalle indagini di campo, risulta essere maggiormente rappresentativo degli acquiferi indagati e maggiormente affidabile per simulazioni previsionali.

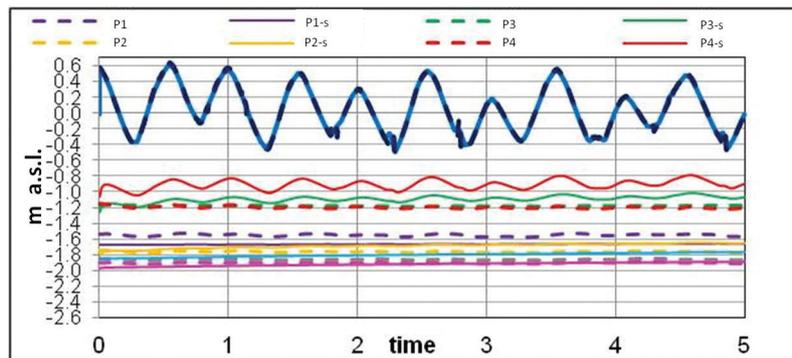


Fig. 10 -Grafico relativo all'andamento nel tempo del livello piezometrico reale (tratteggiato) e simulato (linea continua) nei piezometri target di calibrazione dell'acquifero superficiale.

Fig. 10 - Graph of the real (dashed line) vs simulated (solid line) head value variations, in the monitoring wells identified as calibration target of the superficial aquifer.

Tab. 6 - Statistiche di calibrazione osservate in differenti istanti temporali (secondo modello di flusso).

Tab. 6 - Statistical analysis in different times (second numerical model).

Calibration parameters at different time step		
Parameter: head [m]	Parameter: head [m]	Parameter: head [m]
Num. dati : 18	Num. dati : 18	Num. dati : 18
Max. Residual: 0.15 (m)	Max. Residual: 0.14 (m)	Max. Residual: 0.12 (m)
Min. Residual: -0.26 (m)	Min. Residual: -0.23 (m)	Min. Residual: -0.36 (m)
Abs. Max. Residual: 0.18 (m)	Abs. Max. Residual: 0.23 (m)	Abs. Max. Residual: 0.36 (m)
Abs. Min. Residual: 0.00 (m)	Abs. Min. Residual: 0.00 (m)	Abs. Min. Residual: 0.01 (m)
Residual Mean : 0.02 (m)	Residual Mean : -0.02 (m)	Residual Mean : -0.04 (m)
Abs. Residual Mean : 0.07 (m)	Abs. Residual Mean : 0.07 (m)	Abs. Residual Mean : 0.09 (m)
Standard Error of the Estimate : 0.023 (m)	Standard Error of the Estimate : 0.021 (m)	Standard Error of the Estimate : 0.027 (m)
Root Mean Squared : 0.097 (m)	Root Mean Squared : 0.09 (m)	Root Mean Squared : 0.078 (m)
Normalized RMS: 8.29 (%)	Normalized RMS: 7.08 (%)	Normalized RMS: 9.51 (%)
Correlation Coefficient : 0.97	Correlation Coefficient : 0.97	Correlation Coefficient : 0.97

Risultati Terzo modello

Il modello di flusso (stato stazionario) e di trasporto di contaminanti (stato transitorio) è stato eseguito lungo una sezione parallela al flusso di falda, in corrispondenza di tre punti di monitoraggio multilivello, al fine di simulare l'influenza delle eterogeneità idrogeologiche sul trasporto dei contaminanti in falda.

In Figura 11 si riporta la distribuzione della contaminazione lungo la sezione in corrispondenza di istanti temporali successivi.

I risultati del modello di trasporto relativi alla distribuzione della contaminazione del sito sono stati confrontati con le concentrazioni dei parametri analitici relative ai risultati

dei campionamenti delle acque di falda in corrispondenza del sistema di monitoraggio multilivello. Nella Figura 12 è possibile osservare il risultato delle simulazioni numeriche e il confronto con i dati di campo. Il modello è stato realizzato prendendo in considerazione i parametri idrodispersivi derivanti dai test con traccianti ed è stato confrontato con i dati di velocità calcolati dalle prove di campo. Poichè si tratta di un modello previsionale, il confronto qualitativo tra i risultati modellistici e i risultati di campo fornisce importanti informazioni in merito al ruolo che le eterogeneità degli acquiferi in gioco possono avere sul trasporto e distribuzione dei contaminanti.

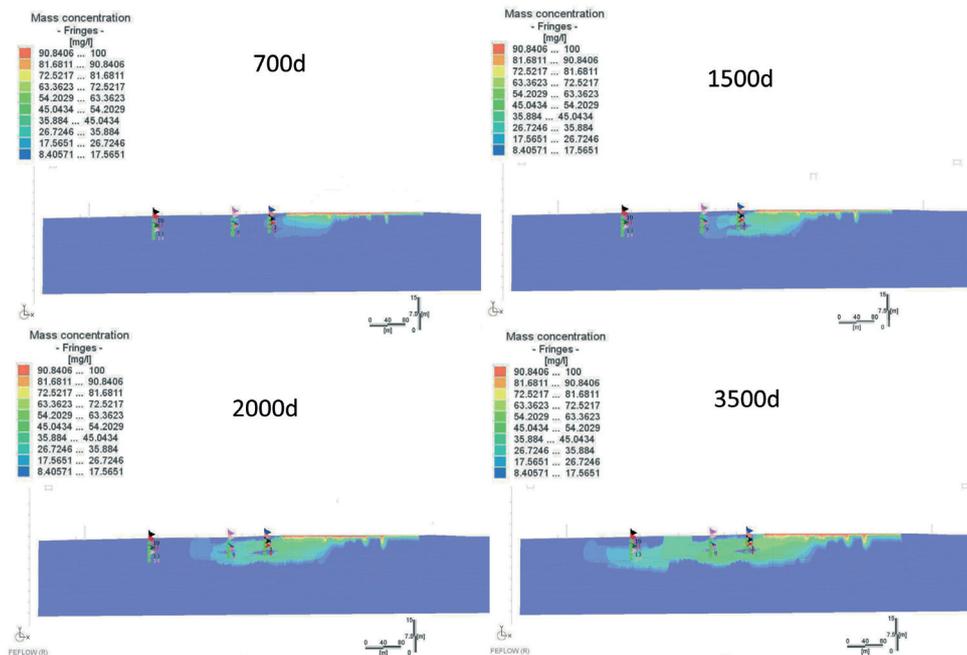


Fig. 11 - Risultato delle simulazioni modellistiche lungo la sezione del modello 2D.

Fig. 11 - Results from model simulation of third model.

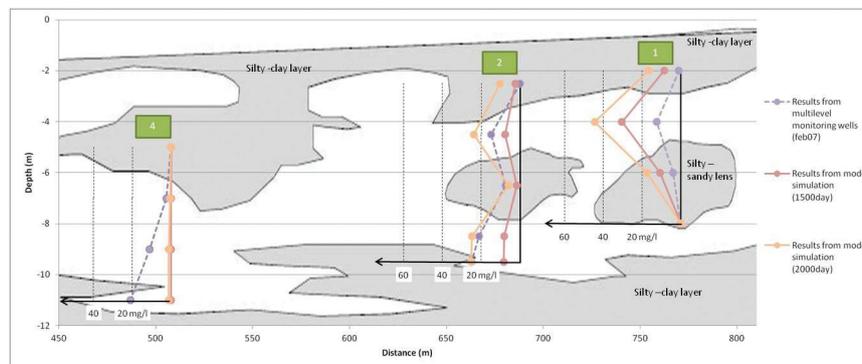


Fig. 12 - Risultati derivanti dal modello numerico 2D e confronto con i risultati dei multilivello .

Fig. 12 - 2D models results and comparison with multilevels results.

Discussione risultati

I risultati analitici derivanti dal prelievo selettivo delle acque alle varie profondità del sistema di monitoraggio multilivello hanno permesso di valutare la distribuzione verticale della contaminazione, anche in relazione alla distanza dall'ipotetica sorgente. I risultati hanno permesso di osservare che la più alta concentrazione di contaminanti nel primo acquifero è localizzata a profondità intermedie in prossimità della zona sorgente di contaminazione, mentre risulta a maggiori profondità verso la zona più lontana del pennacchio. Tali risultati mostrano in via preliminare l'effettiva distribuzione verticale dei contaminanti, evidenziando una migrazione verso il basso dei composti in soluzione nella prima falda.

I risultati della prima serie di test idraulici e con traccianti sono stati utili per comprendere le connessioni tra il sistema idrogeologico superficiale e l'acquifero profondo. I test hanno rivelato una connessione parziale tra la falda acquifera e la falda profonda (Fig. 7), attraverso lo strato di separazione argilloso limoso, che si verifica unicamente dalla falda profonda a quella superiore ed in condizioni di richiamo delle acque attraverso un pompaggio.

Gli altri test con traccianti hanno consentito di ricavare i parametri idrodispersivi dell'acquifero, utilizzati successivamente nelle simulazioni di trasporto dei contaminanti.

I risultati dei test di campo eseguiti in prossimità delle acque lacustri (Fig. 8) hanno permesso di calcolare la velocità di deflusso della falda nella zona lungo il margine lacustre, oltre a permettere di comprendere la reale efficacia della barriera idraulica in confronto ai calcoli teorici.

I test con traccianti hanno mostrato un parziale scostamento tra la teorica area di cattura dei pozzi e la reale efficacia del sistema di emungimento. Tale evidenza ha fatto supporre la presenza di eterogeneità nell'acquifero che non permettono un'efficacia ottimale dei pozzi presenti, in relazione alla posizione reciproca delle fenestrature e degli orizzonti più fini. Allo stato attuale, sono ancora in corso test di campo con traccianti finalizzati a comprendere meglio eventuali percorsi preferenziali dei contaminanti lungo la zona prossima alla barriera idraulica e al lago costiero, in relazione alla presenza di lenti limose all'interno di una falda principalmente sabbiosa.

Per quanto riguarda gli studi modellistici, il primo modello di flusso (alle differenze finite), in stato stazionario, ha permesso di valutare l'efficacia delle azioni di messa in sicurezza di emergenza esistenti e di progettare gli interventi di miglioramento dei sistemi di contenimento degli inquinanti sulla base delle simulazioni condotte in corrispondenza di diversi livelli di marea.

Il secondo modello di flusso (agli elementi finiti), eseguito in transitorio, ha permesso la rappresentazione delle complesse variazioni nel tempo delle condizioni al contorno e le interazioni tra acque superficiali e sotterranee del sito. Il confronto degli andamenti nel tempo dei carichi idraulici simulati e reali e i risultati delle statistiche di calibrazione, condotte in istanti temporali significativi dal punto di vista idraulico, ha

permesso di considerare il modello numerico di flusso implementato adatto per effettuare simulazioni previsionali volte a supportare le successive fasi di studio e progettazione delle operazioni di bonifica del sito.

Questo modello ha consentito di ottenere i seguenti risultati:

- valutare l'efficienza della barriera idraulica in relazione alle differenti condizioni di flusso variabili nel tempo, in modo da consentire una gestione ottimale della barriera idraulica esistente;
- effettuare valutazioni sulle dinamiche idrogeologiche del sistema analizzando i rapporti acque superficiali e sotterranee in stato transitorio: in particolare lo studio ha analizzato la variazione del livello piezometrico nel tempo influenzato dall'oscillazione del livello del mare e del livello delle acque lacustri.

Il terzo modello numerico (elementi finiti) di flusso e di trasporto, è stato realizzato in 2D, in regime di flusso stazionario e di trasporto in stato transitorio, lungo una sezione parallela al flusso di falda, in corrispondenza di tre punti di monitoraggio multilivello.

Il modello ha permesso di ottenere i seguenti risultati:

- simulare l'influenza delle eterogeneità idrogeologiche sul trasporto dei contaminanti in falda;
- dimostrare, seppur in termini qualitativi, l'influenza delle eterogeneità verticali sul trasporto di contaminanti lungo l'area del *plume*: infatti, i risultati del modello di trasporto relativi alla distribuzione della contaminazione del sito sono in accordo con i risultati dei campionamenti delle acque di falda in corrispondenza del sistema di monitoraggio multilivello;
- comprendere che la presenza di marcate eterogeneità nel sistema in esame consente inoltre di spiegare il parziale scostamento tra i risultati di campo e i conti teorici inerenti le aree di cattura dei pozzi.

Conclusioni

I dati provenienti dalle indagini di campo, unitamente ai risultati delle simulazioni modellistiche, hanno permesso di identificare la presenza di porzioni di acquifero che influenzano in modo diverso il trasporto dei contaminanti presenti in falda.

La presenza di eterogeneità nell'acquifero consente di spiegare i risultati di campo ottenuti grazie ai monitoraggi dei parametri chimici effettuati sui piezometri multilivello. Il modello 2D è stato infatti utilizzato per inquadrare tali risultati in un modello concettuale dell'acquifero che comprenda la presenza di lenti argilloso-limose su un acquifero sabbioso.

Tali evidenze, derivanti da dati di campo, unitamente alle ipotesi concettuali elaborate anche con il supporto di modelli numerici, andranno comunque verificate attraverso ulteriori test in corso di progettazione e realizzazione.

La sinergia ottenuta tra i test di campo e gli studi modellistici ha permesso di valutare l'effetto indotto dalle eterogeneità sul trasporto dei contaminanti presenti, consentendo di ipotizzare un modello concettuale che possa rappresentare meglio i risultati dei dati di campo.

I risultati derivanti da tali studi e il modello concettuale ottenuto per il sito in esame hanno permesso di pianificare ulteriori approfondimenti di indagine e orientare al meglio la progettazione dei futuri sistemi di messa in sicurezza e bonifica.

Ringraziamenti: Si ringrazia il Dott. Geol. Uggeri S. per il supporto tecnico e la collaborazione alla fase progettuale e realizzativa delle attività di indagine idrogeologica in campo.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson M.P., Woessner W.W. 1992. Applied groundwater modeling. Simulation and flow and advective transport. Academic Press, Inc., San Diego.
- Bouwer, H. and R.C. Rice, 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, pp. 423-428.
- Bear J. 1972. Dynamics of fluid in porous media, Ed, Elsevier, New York.
- Bear, J. & Verruijt, A., 1992. Modeling Groundwater Flow and Pollution. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company.
- Beretta G.P. 1992. Idrogeologia per il disinquinamento "*Hydrogeology for the decontamination*". Pitagora, Bologna
- Boulton, N.S., 1963. Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 26, pp. 469-482.
- Chiesa, G. 1994. Inquinamento delle acque sotterranee "*Groundwater pollution*". Busto Arsizio (Va): Ulderico Hoepli Editore S.p.a. .
- Diersch, H.J.G. 2002. Wasy Software® – Feflow: Finite Element Sub-surface Flow & Transport Simulation System: Reference Manual. Wasy Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd.
- Fetter, C.W., 1999. Contaminant Hydrogeology. Second edition. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.: Prentice Hall Inc.
- Franconi V., 2008. I parametri idrogeologici ed idrodispersivi "*The hydrogeological and hydro-dispersive parameters*". Presentazione al Geofluid, Piacenza, 2008.
- Hantush, M.S. and C.E. Jacob, 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 36, no. 1, pp. 95-100.
- Hantush, M.S. and C.E. Jacob, 1955. Non-steady Green's functions for an infinite strip of leaky aquifer, *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 36, no. 1, pp. 101-112.
- Hantush, M.S. and C.E. Jacob, 1955. Steady three-dimensional flow to a well in a two-layered aquifer, *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 36, no. 2, pp. 286-292.
- Harbaugh, A. et al. 2000. MODFLOW-2000, The US geological survey modular groundwater model. USGS Open-File Report 00-92.
- Harbaugh, A., E. Banta, M. Hill, and M. McDonald, 2000, MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process, Open File Report 00-92, U. S. Geological Survey, Denver, CO.
- Smart P.L. (1982): A review of the toxicity of 12 fluorescent dyes used for water tracing. *Water Resources Res.* 13 (1), 15-33.
- Hill, M., E. Banta, A. Harbaugh, and E. Anderman, 2000, MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User guide to the Observation, Sensitivity, and Parameter-Estimation Processes and Three Post-Processing Programs, Open File Report 00-184, U. S. Geological Survey, Denver, CO
- Hill, M., E. Banta, A. Harbaugh, and E. Anderman, 2000, MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User guide to the Observation, Sensitivity, and Parameter-Estimation Processes and Three Post-Processing Programs, Open File Report 00-184, U. S. Geological Survey, Denver, CO.
- Langmuir, D. 1997. Aqueous environmental geochemistry. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.: Prentice Hall Inc
- Hill M., Tiedeman C. (2007). Textbook: Effective Groundwater Model Calibration, with Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty, by. Wiley and Sons, publisher.
- Leibundgut Hadi S. (1997): A contribution to toxicity of fluorescent tracers. - in "Tracer Hydrology", 97, Proceedings of the 7th International Symposium on water tracing, Portoroz, 26-31 may 1997.
- Neuman, S.P., 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response of the water table, *Water Resources Research*, vol. 8, no. 4, pp. 1031-1045.
- Neuman, S.P., 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resources Research*, vol. 11, no. 2, pp. 329-342.
- Smart P.L. (1982): A review of the toxicity of 12 fluorescent dyes used for water tracing. *Water Resources Res.* 13 (1), 15-33.
- Spitz, K. and Moreno, J. 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 16, pp. 519-524.
- U.S. Geological Survey. 2005. MODFLOW-2005. Modular groundwater model – the groundwater flow process.
- Pollock, D.W., 1994, User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference groundwater flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-464, 6 ch.
- Parriaux A. et al. (1988): Guide pratique pour l'usage des traceurs artificiels in hydrogeologie. Societé Geologique Suisse.
- Uggeri A., Vigna B (1997): Use of optical brighteners in applied hydrogeology. - in Tracer Hydrology 97, edited by A.Kranjc, Proceedings of the 7th International Symposium on water tracing, Portoroz, 26-31 may 1997