

Modello numerico di flusso e trasporto del sistema acquifero della pianura del Cecina (Toscana, Italia), con l'uso di elaborazioni GIS

Groundwater Flow and Transport Model in Cecina Plain (Tuscany, Italy) using GIS processing

Riccardo Armellini, Elena Baldini, Dario Del Seppia, Fabrizio Franceschini, Natacha Gori, Stefano Menichetti, Stefano Tessitore

Riassunto: Il presente lavoro fornisce un quadro conoscitivo aggiornato e descrive la modellazione di flusso e trasporto della contaminazione da tricloroetilene e tetracloroetilene dell'acquifero costiero di Cecina. Lo studio della contaminazione, originata da una sorgente sita nell'area di Poggio Gagliardo (Montescudaio, Pisa), si è reso necessario per consentire agli enti e soggetti preposti al controllo di ottimizzare le attività in corso di monitoraggio, messa in sicurezza e futura bonifica della falda, ed è stato articolato in due principali fasi:

- definizione del modello concettuale dell'acquifero, supportata da analisi ed elaborazioni GIS su numerose stratigrafie e su dati chimici delle acque, raccolti dal 2004 al 2012, su sei pozzi ad uso acquedottistico;
- modellazione numerica di flusso e di trasporto con i codici MODFLOW 88/96 e MT3D mediante l'interfaccia grafica GroundWaterVistas 5.

Il modello concettuale assume un acquifero multistrato nella zona costiera-planiziale, esteso fino ai rilievi collinari sabbiosi argillosi ed alimentato dalla ricarica zenitale e dal Fiume Cecina.

Parole chiave: dati geochimici, database, analisi statistica, sistema informativo geografico, geostatistica, modelli di flusso e trasporto delle acque sotterranee.

Keywords: geochemical data, database, statistical analysis, geographical information system, geostatistics, groundwater and solute transport modelling.

Natacha GORI ✉
Università di Pisa,
Lungarno Pacinotti 43 - 56126 Pisa
natacha.gori@gmail.com

Riccardo ARMELLINI
Università di Firenze - Dipartimento di Storia, Archeologia,
Geografia, Arte, Spettacolo
Via S. Gallo, 10 - 50129 Firenze
armellini.r@gmail.com

Elena BALDINI
Dario DEL SEPPIA
Fabrizio FRANCESCHINI
Stefano MENICHETTI
Stefano TESSITORE
ARPAT Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana
Direzione Tecnica, Dipartimenti Pisa e Livorno.

Ricevuto: 16 dicembre 2014 / Accettato: 25 marzo 2015
Pubblicato online: 31 marzo 2015

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© Associazione Acque Sotterranee 2015

L'acquifero presenta caratteristiche idrodinamiche che svolgono un ruolo importante sia per la diffusione della contaminazione, con presenza di una falda sospesa molto inquinata separata dalla falda produttiva sottostante, sia per il bilancio idrico, per uno spesso livello di separazione che limita gli scambi tra fiume e seconda falda.

Il modello numerico, costruito in più fasi utilizzando un modello concettuale del sistema acquifero progressivamente più complesso, supporta le campagne di monitoraggio condotte dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT), ricercando una possibile previsione in base a scenari di minimo e di massimo afflusso, ed è impiegato come strumento di supporto alle decisioni per le attività di bonifica e/o messa in sicurezza della falda.

Gli sviluppi futuri riguardano l'implementazione del modello di trasporto multistrato, sulla base di una campagna di acquisizione dati mirata, e un definitivo accoppiamento con il modello idrologico regionale MOBIDIC.

Abstract: *This work provides a groundwater flow and transport model of trichloroethylene and tetrachloroethylene contamination in the Cecina's coastal aquifer. The contamination analysis, with source located in the Poggio Gagliardo area (Montescudaio, Pisa), was necessary to optimize the groundwater monitoring and remediation design. The work was carried out in two phases:*

- *design of a conceptual model of the aquifer using GIS analysis of many stratigraphic, chemical and hydrogeological data, collected from 2004 to 2012 in six aqueduct wells;*
- *implementation of a groundwater flow and transport numerical model using the MODFLOW 88/96 and MT3D code and the graphical user interface GroundWaterVistas 5.*

The conceptual model hypothesizes a multilayer aquifer in the coastal plain extended to the sandy-clay hills, recharged by rainfall and by the Cecina River.

The aquifer shows important hydrodynamic features affecting both the contamination spreading, due to the presence of a perched and heavily polluted layer separate from the underlying productive aquifer, and the hydrological balance, due to a thick separation layer that limits exchanges between the river and the second groundwater aquifer.

The numerical model, built using increasingly complex versions of the initial conceptual model, has been calibrated using monitoring surveys conducted by the Environmental Protection Agency of Regione Toscana (ARPAT), in order to obtain possible forecast scenarios based on the minimum and maximum flow periods, and it is currently used as a tool for decision support regarding the reclamation and/or protection of the aquifer. Future developments will regard the implementation of the multilayer transport model, based on a new survey, and the final coupling with the regional hydrological model named MOBIDIC.

Introduzione

L'acquifero della Pianura di Cecina costituisce una risorsa idrica indispensabile per rifornire di acqua potabile, irrigua ed industriale un'importante area della Toscana meridionale. Varie problematiche quali la ridotta disponibilità idrica, l'intrusione salina e la presenza di inquinamento diffuso da nitrati rendono tuttavia difficoltoso il prelievo idrico. Si è reso pertanto necessario comprendere in modo sempre più approfondito il funzionamento del sistema acquifero, per gestire lo sfruttamento della risorsa idrica proteggendola al contempo dal depauperamento quantitativo e qualitativo. In tal senso sono stati realizzati vari studi (Ambrosio e Fagioli 2001; ARPAT 2003; Genovese 2003) che hanno previsto l'uso della modellistica applicata alle acque sotterranee.

Nel 2004 si è evidenziata, inoltre, una contaminazione da organoalogenati proveniente da un sito contaminato. In assenza di provvedimenti da parte dei soggetti individuati come responsabili, gli enti hanno dato vita ad uno specifico accordo di programma (Regione Toscana 2004) per la definizione ed attuazione delle necessarie operazioni di bonifica. In tale ambito è stato richiesto ad ARPAT, che già aveva eseguito il monitoraggio pluriennale del pennacchio inquinante, la realizzazione di uno studio che prevedesse l'uso della modellistica per l'ottimizzazione delle attività di monitoraggio, messa in sicurezza e bonifica della falda (ARPAT 2013).

Il presente lavoro riporta i risultati più rilevanti emersi dallo studio di ARPAT che si è caratterizzato per un rilevante aggiornamento ed integrazione del quadro conoscitivo, sia in

tema di nuovi elementi di natura geologica maturati dai recenti rilievi del Progetto CARG (Benvenuti et al. 2008), sia per la disponibilità di dati stratigrafici, maturati dal progetto regionale di Caratterizzazione dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi (IGG-CNR-LAMMA 2009) ed ulteriormente integrati.

E' stato affrontato il tema della modellazione del trasporto dei composti organoalogenati e, come ulteriore elemento di novità, si è proceduto nel tentativo di interfacciare il modello idrogeologico con il modello idrologico MOBIDIC (Campo et al. 2006), utilizzato costantemente dal Servizio Idrologico Regionale per la previsione delle piene.

Area di Studio

L'area di studio ricade nella porzione di territorio a Sud del fiume Cecina, all'interno delle Province di Pisa e Livorno, nei Comuni di Cecina e Montescudaio. Si tratta di una pianura costiera con fascia di dune a Sud-Ovest, che con più ordini di terrazzamenti marini si raccorda ai rilievi collinari a Nord – Est.

Dal punto di vista geologico (Fig. 1) la zona costiera è caratterizzata da depositi quaternari pleistocenici di origine fluviale, eolica e marino-transizionale (Mazzanti 1988). Studi più recenti hanno riconosciuto, all'interno della sequenza sintemica del Fiume Cecina (Pleistocene inferiore finale superiore), numerosi subsistemi e distinte litofacies con evidenze di un intenso controllo tettonico dato da faglie dirette (Benvenuti et al. 2008).

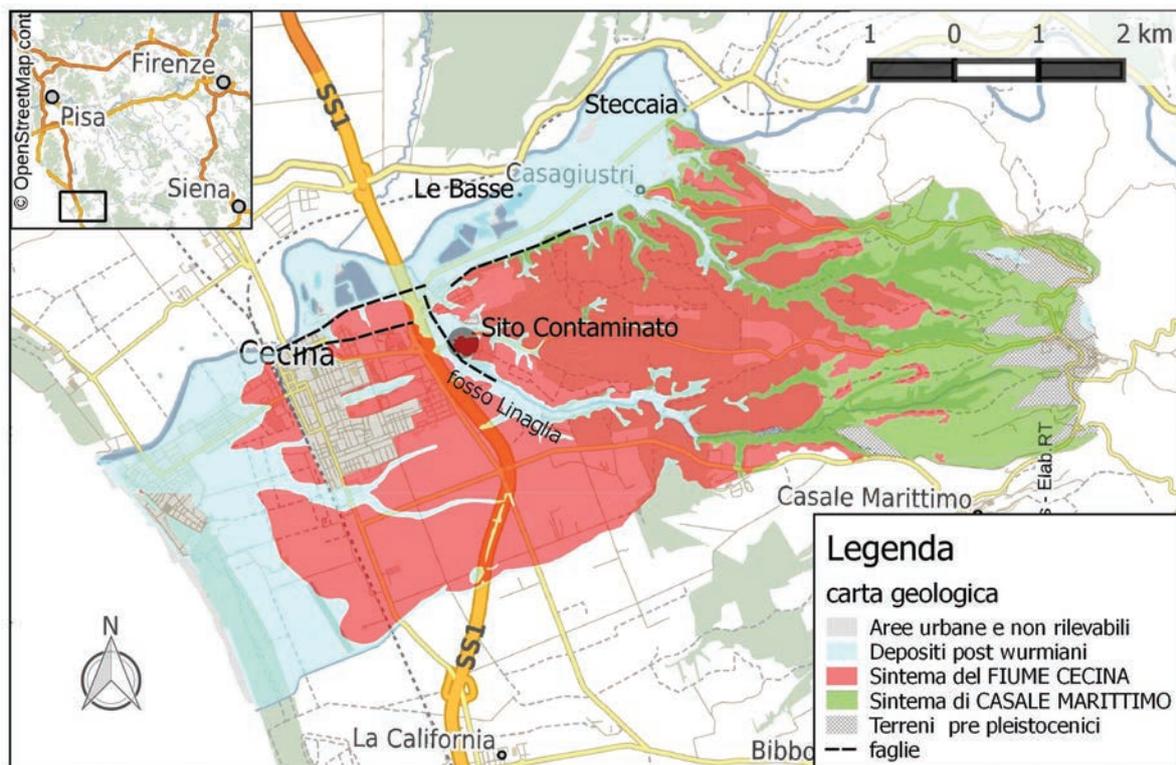


Fig. 1 - Carta geologica (semplificata da Benvenuti et al. 2008).

Fig. 1 - Geologic map (simplified after Benvenuti et al. 2008).

Questi depositi eterometrici, di diversa origine e natura, sono caratterizzati principalmente, fino a 40 m di spessore, da sabbie, ghiaie, arenarie, conglomerati e interstrati sabbioso limosi (Pranzini 2003, 2004; IGG CNR.LAMMA 2009).

La storia della contaminazione inizia nel 2004 con l'accertamento di un inquinamento da sostanze organo-alogenate, tetracloroetilene (PCE) e tricloroetilene (TCE) nella falda di Cecina, con superamento dei limiti di potabilità (somma PCE+TCE = 10 µg/L). La zona sorgente della contaminazione, in seguito ad accertamenti svolti in collaborazione con l'Azienda Sanitaria Locale, è stata riconosciuta nell'area industriale - artigianale del Fiorino in località Poggio Gagliardo (Fig. 2), dove in passato erano operanti una lavanderia industriale e una conceria, in seguito dismesse.

La Messa in Sicurezza di Emergenza (MISE) iniziale è stata effettuata con due pozzi reperiti in loco (Giannelli e La Rapida), trasformati in pozzi barriera, con annesso impianto di trattamento delle acque con filtri a carboni attivi (*pump & treat*). Per controllare e limitare il movimento del plume inquinato, che si stava spostando in direzione sudovest verso l'abitato di Cecina, anche un terzo pozzo, Ladronaia, dello stesso acquedotto di Cecina, con annesso impianto *pump & treat*, è stato mantenuto in pompaggio. Le difficoltà di approvvigionamento idrico dell'acquedotto di Cecina hanno consentito solo una limitata riduzione delle portate dei pozzi, per i quali si è resa necessaria l'installazione di ulteriori impianti di trattamento a carboni attivi. Nell'ambito MISE è stato inoltre definito un piano di monitoraggio del pennacchio di contaminazione

Nel primo periodo di funzionamento degli impianti di trattamento (da maggio 2004 a gennaio 2005) sono stati estratti dalla falda circa 715 Kg di PCE e TCE. La contaminazione è

sembrata diminuire progressivamente fino al 2009, anno che ha coinciso con un'elevata piovosità, quando si è verificato un brusco incremento delle concentrazioni di contaminante. La Regione Toscana, che nel frattempo aveva completato la predisposizione e l'iter di approvazione del progetto di bonifica, ha dunque deciso di procedere con urgenza nella realizzazione di un primo stralcio del progetto rappresentato dalla messa in esercizio di due nuovi pozzi barriera, CD4 e CD5, già realizzati nell'ambito della caratterizzazione del sito contaminato.

Con l'attivazione dei due pozzi, avvenuta nell'estate 2012, con portate stabilite dal progetto, la Regione Toscana ha chiesto dunque ad ARPAT, nell'ambito del succitato Accordo di Programma, di provvedere alla realizzazione di un modello idrogeologico in grado di calibrare e gestire opportunamente gli emungimenti dai pozzi presenti nell'area, sia come sistema di barrieramento idraulico, sia come approvvigionamento acquedottistico. Il modello doveva inoltre supportare il programma di monitoraggio svolto con cadenza mensile.

Materiali e Metodi

La ricostruzione geometrica del sistema acquifero si è basata su di un database regionale SIRA-DBGEO delle stratigrafie (ARPAT 2007) in cui sono raccolte informazioni georeferenziate, relative a varie campagne di indagine condotte sul territorio regionale. Il database è composto da uno shapefile puntuale dei sondaggi, collegato ad altre tabelle relative alla successione degli strati e per la decodifica di unità geologiche ed idrogeologiche. Sinteticamente sono riportati il nome, il codice identificativo, la quota sul livello del mare, la descrizione dello strato, le quote (in metri dal piano campagna) del tetto e del letto dello strato stesso e la fonte dei dati.



Fig. 2 - Area di studio.

Fig. 2 - Study area.

Il database regionale è stato integrato con l'inserimento di 97 sondaggi e relativi 1133 strati. Sui dati stratigrafici archiviati è stata quindi realizzata un'interpretazione geologica, basata sulla cartografia ufficiale CARG, ed idrogeologica con il supporto di un apposito script sviluppato all'interno del GIS ESRI - *ArcView 3.x* (ARPAT 2007).

L'elaborazione delle superfici è stata condotta mediante l'estensione ESRI *ArcGis Geostatistical Analyst*, applicando il metodo Kriging. Per la successiva manipolazione e calcolo degli spessori degli orizzonti idrogeologici, ci si è avvalsi dello strumento *Raster Calculator* dell'estensione ESRI *ArcGis Spatial Analyst*.

Per la stima della ricarica zenitale sono stati confrontati i risultati del modello *Kennessy* (Barazzuoli et al. 1986) di generazione dei deflussi, con il modello idrologico MOBIDIC (Campo et al. 2006), reso disponibile dal Servizio Idrologico Regionale.

Per la definizione delle condizioni piezometriche di riferimento sono state utilizzate le cartografie piezometriche dei mesi di maggio e dicembre 2002, pubblicate da IGG-CNR-LAMMA (2009) e verificate con rilievi non pubblicati della Regione Toscana e ARPAT del 2006 e del 2009.

I parametri idrodinamici di trasmissività T e immagazzinamento S sono stati determinati elaborando i dati di 10 prove di pompaggio.

Lo sviluppo del modello di flusso del sistema e la successiva modellazione del fenomeno di contaminazione della falda idrica da organoalogeni, entrambi con discretizzazione e risoluzione numerica alle Differenze Finite (*Finite Difference Method - FDM*), è stata condotta mediante l'impiego del software *GroundWaterVistas 5* (Rumbaugh e Rumbaugh 2007) che utilizza:

- il codice di calcolo MODFLOW (Harbaugh e McDonald 1996) per la soluzione di equazioni di flusso idrico sotterraneo. Dove K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} sono i valori di conducibilità idraulica (L^3T^{-1}); b è il carico idraulico (L), W è il flusso volumetrico per unità di volume e rappresenta gli apporti o le perdite di acqua (T^{-1}), con $W < 0$ per i flussi in uscita dall'acquifero e $W > 0$ per quelli in ingresso, S_s è lo "storage" specifico del materiale poroso (L^{-1}) e t è il tempo (T).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} = L^3 T^{-1}$$

- il codice di calcolo MT3D (Zheng 1990 e successivi sviluppi) per la simulazione dei processi di avvezione, dispersione e ritardo dei contaminanti nelle acque sotterranee. Dove C concentrazione disciolta (ML^3), v velocità del fluido (LT^{-1}), D coefficiente di dispersione idrodinamica (L^2T^{-1}), q_s (T^{-1}) e C_s (ML^{-3}) pozzi o sorgenti e relative concentrazioni, θ porosità (adim.), ρ_b peso di volume (ML^{-1}), \bar{C} concentrazione nel mezzo poroso (MM^{-1}), λ costante di decadimento per reazioni del primo ordine (T^{-1}) e t il tempo (T).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{\partial}{\partial x_j} (D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \left[\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \right] = ML^{-3} T^{-1}$$

Modello Concettuale

L'alternanza dei depositi prevalentemente incoerenti di origine fluviale, eolica e marino-transizionale costituisce, nel suo complesso, una struttura acquifera unitaria, anche se con diverse tipologie di falda idrica, secondo le aree prese in considerazione. Il substrato è dato dalla spessa e caratteristica litofacies argillosa del subsistema del torrente le Botra (Sistema di Casale Marittimo del Pleistocene inferiore) già nota come formazione ad Artica Islandica (Mazzanti 1983; Pranzini 2003; Benvenuti et al. 2008).

Nell'area sorgente della contaminazione, in località Poggio Gagliardo, come risultato dalla caratterizzazione, un orizzonte argilloso "interstrato" separa un acquifero superficiale, con livelli di contaminazione molto maggiori, da uno profondo. Un ulteriore "interstrato" argilloso determina una importante separazione del flusso idrico anche nelle adiacenti aree di pianura in sinistra idrografica del Fiume Cecina. Tale orizzonte, testimone (Benvenuti et al. 2008) della fase olocenica in cui il Cecina sfociava in un delta più a nord, si annulla in corrispondenza della località Steccaia e si ispessisce rapidamente verso mare, separando già nella località Le Basse una prima falda, in connessione con il corso d'acqua, da una più profonda che limita la propria alimentazione all'area della Steccaia ed ai margini dell'area in studio.

Ulteriore elemento influente sul modello concettuale è dato dalla faglia sul Fosso Linaglia (Benvenuti et al. 2008), che con direzione NO-SE rialza l'abitato di Cecina rispetto alla zona di Poggio Gagliardo e si assume interrompa la continuità dell'interstrato nell'area sorgente.

La ricarica della struttura acquifera, sia superficiale che profonda, avviene in parte attraverso l'infiltrazione diretta nella pianura delle acque meteoriche ed in parte dalle perdite di subalveo del Fiume Cecina, particolarmente intense nella zona della Steccaia. Un ulteriore contributo alla ricarica si ha dai rilievi collinari della formazione delle Sabbie ed Argille ad Artica

La conducibilità idraulica, che ha avuto come riferimento l'interpretazione di alcune prove di pozzo e di falda, è stata riconosciuta in tre diverse classi e tipi idrogeologici (Tab. 1). La stima dei parametri di immagazzinamento si è potuta basare su due sole prove.

In generale la piezometria si caratterizza per un'estesa area centrale di drenaggio che intercetta i flussi provenienti dai rilievi collinari. Tale condizione rappresenta un'evidente di-

Tab. 1 - Domini idrogeologici e conducibilità idrauliche assegnate.

Tab. 1 - Hydrogeological domains and assigned hydraulic conductivity.

Unità Idrogeologica	Conducibilità idraulica m/s	Storatività
ghiaie sciolte del Cecina	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$	0,1 - 0,15
calcareniti e conglomerati dei terrazzi pleistocenici	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	
sabbie e calcareniti del pleistocene inferiore	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$	

scontinuità altimetrica, geologica e di permeabilità con le formazioni dei terrazzi alluvionali costieri della pianura. Particolare convergenza si ha verso l'abitato di Cecina. Le variazioni stagionali non modificano eccessivamente l'andamento della piezometria; si evidenzia comunque uno spostamento verso nord-ovest dell'area con quota piezometrica pari o al di sotto dello zero di riferimento (Fig. 3)

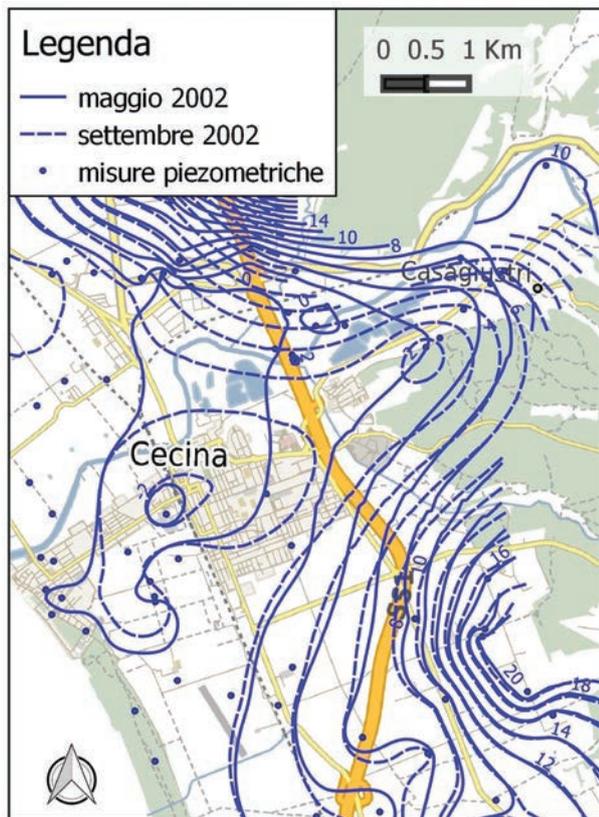


Fig. 3 - Carte piezometriche.

Fig. 3 - Piezometric Maps.

Un quadro di sintesi dell'evoluzione della contaminazione è offerto dal grafico (Fig. 4) che riporta in scala logaritmica le concentrazioni di TCE+PCE, osservate nei tre pozzi dell'acquedotto (Ladronaia, Peep, San Vincenzino) in raffronto alle piogge mensili.

Il periodo 2004-2012 presenta un andamento caratteristico, con due anni idrologici di eccezionale magra dal 2006 al 2008, cui succedono ben tre annualità idrologiche molto umide, dal 2008 al 2011.

I riflessi sullo stato di qualità dell'acquifero di Cecina sono evidenti in coincidenza del brusco innalzamento freaticco dell'autunno molto umido 2008-2009. Si osservano infatti massimi di concentrazione dei contaminanti, con generale inversione di tendenza, visibile in particolare nei pozzi Peep e San Vincenzino dell'acquedotto di Cecina.

Modellazione Numerica

La modellazione numerica è stata eseguita in più fasi, utilizzando un modello concettuale del sistema acquifero progressivamente più complesso, partendo dalle condizioni di monostrato in regime stazionario naturale fino a quelle di multistrato in regime transitorio. Le simulazioni in regime transitorio, condotte con *stress period* trimestrale e *time step* mensili, hanno riguardato il periodo 2005 -2010.

L'area modellata ha una superficie complessiva di ca. 30 Km². Il reticolo di discretizzazione orizzontale impiegato per la costruzione del modello è costituito, per singolo strato, da 11481 (2994 attivi) elementi finiti o celle a forma quadrata con lato di 100 m ciascuno.

Sulla base della ricostruzione tridimensionale delle 4 superfici sono stati ricostruiti due modelli separati: monostrato e multistrato, quest'ultimo suddiviso in due strati acquiferi (L2 e L4) effettivamente continui e due strati acquitardi (L1 copertura ed L3 orizzonte argilloso interstrato), solo localmente delimitati per valori specifici di bassa conducibilità idraulica.

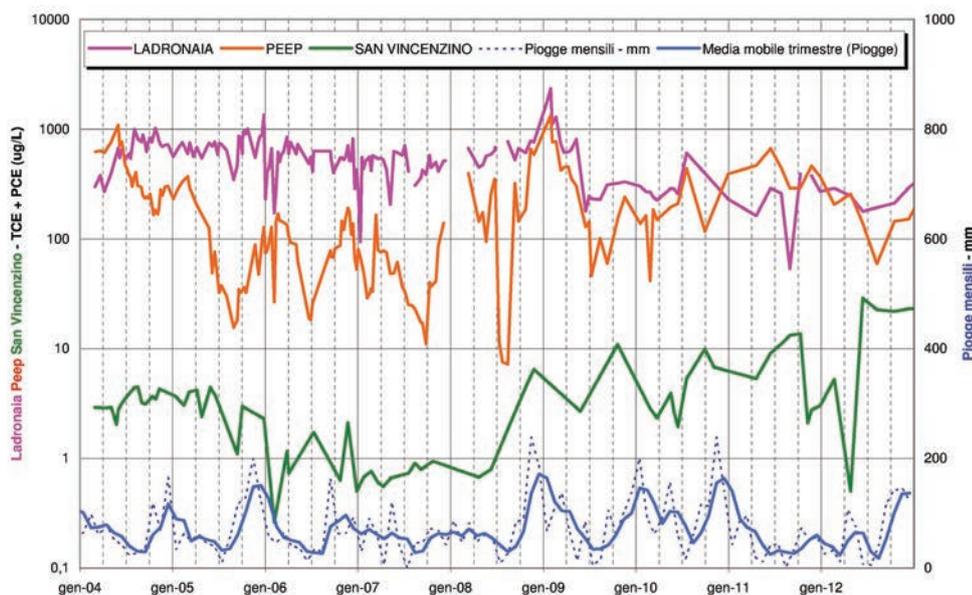


Fig. 4 - Concentrazioni di PCE+TCE nei pozzi Ladronaia (a), Peep (b) e San Vincenzino (c) in raffronto alle piogge mensili nel periodo 2004-2012.

Fig. 4 - PCE+TCE concentrations in Ladronaia (a), Peep (b) and San Vincenzino wells (c) compared to monthly rainfall in 2004-2012 period.

Per quanto riguarda la discretizzazione verticale, sulla base di tutti gli elementi geologici ed idrogeologici acquisiti sono stati ipotizzati tre orizzonti di interesse, rappresentati da:

- base del sistema acquifero, costituita dalla litofacies argillosa del subsistema del Torrente Le Botra (Sintema di Casale Marittimo, Pleistocene inferiore);
- base e tetto degli orizzonti interstrato che separano il flusso idrico nell'area di Poggio Gagliardo (litofacies argillosa del subsistema di Cecina (Sintema del Fiume Cecina, - pleistocene inf. finale - superiore) e nell'area Steccaia - le Basse (litofacies argillosa dei depositi alluvionali post wurmiani olocenici).
- tetto del sistema acquifero, in alcuni casi coincidente con il piano campagna, in altri con la base di un orizzonte indistinto di copertura.

Per i due orizzonti interstrato, benché di età diverse, si è ipotizzato inoltre, sulla base dei dati stratigrafici interpretati, una relativa continuità in direzione del Fiume Cecina. Lo spesso orizzonte argilloso olocenico appare infatti contiguo all'orizzonte più antico.

Dal punto di vista idrogeologico si è proceduto pertanto ad una ricostruzione in continuo di un unico orizzonte interstrato sia nella zona collinare di Poggio Gagliardo, che nella sottostante zona della pianura del Cecina. Al contrario, lungo la faglia del torrente Linaglia, anche in questo caso con diretto riscontro dei dati stratigrafici, è stato posto un limite alla continuità dell'orizzonte interstrato più antico.

MODFLOW richiede la continuità delle celle lungo strati che attraversino con continuità tutto il dominio modellato. Ma poiché è possibile attribuire caratteristiche idrauliche differenti alle celle che compongono lo stesso strato, attraverso l'elaborazione dei *raster*, gli strati delle unità idrogeologiche sono stati fatti proseguire idealmente con spessori convenzionali per l'intero dominio di calcolo, sia gli orizzonti base e tetto dell'interstrato, che quello del tetto del sistema acquifero, demandando alla zonazione delle conducibilità idrauliche l'effettiva presenza o assenza di questi orizzonti.

Le carte idrostrutturali rappresentate in Fig. 5, restituiscono forme che sembrano confermare la forte influenza della tettonica recente nella pianura del Cecina (Benvenuti et al. 2008).

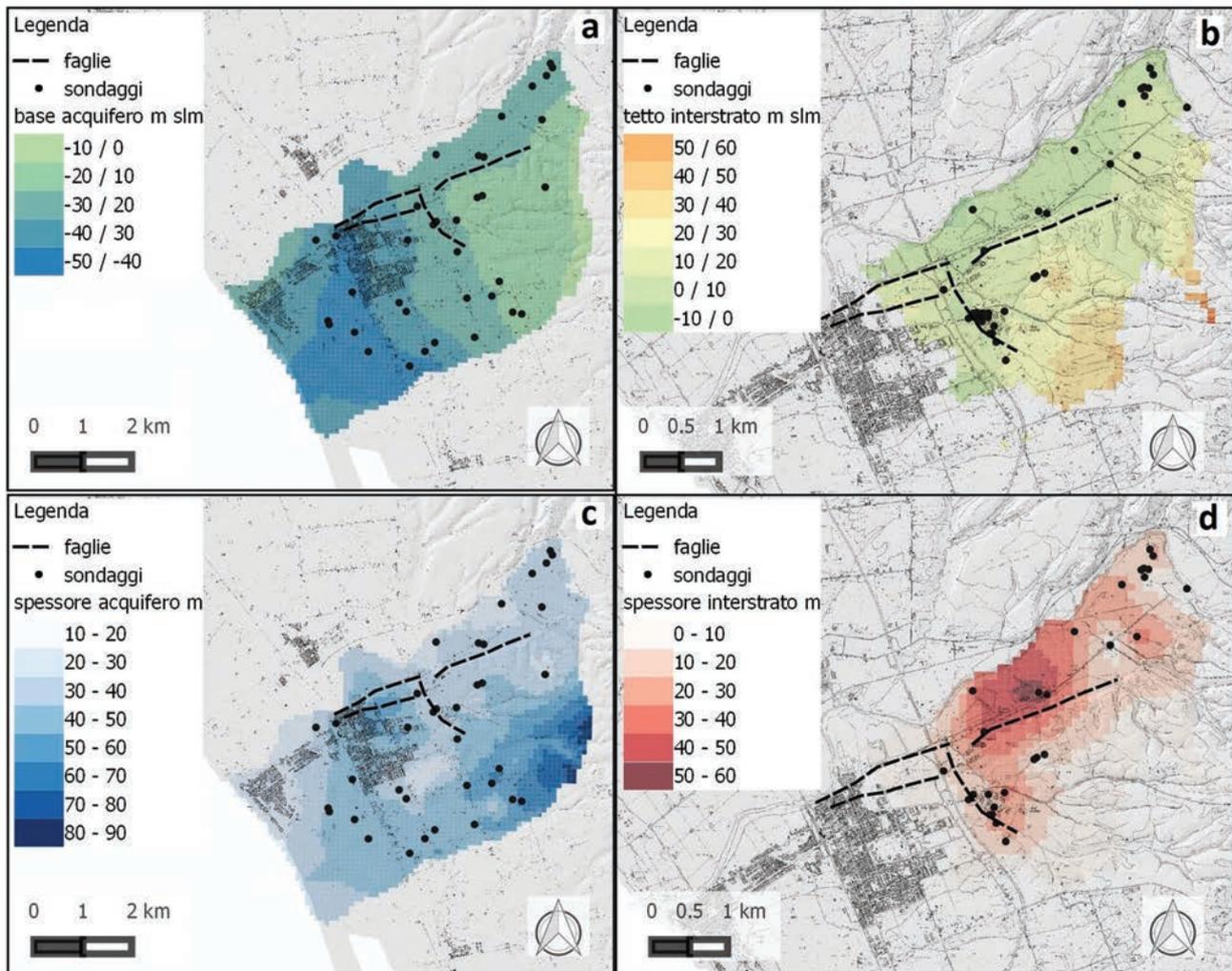


Fig. 5 - Carte idrostrutturali – isobate della base del sistema acquifero (a) e del tetto dell'interstrato (b), isopache del sistema acquifero (c) ed interstrato (d).

Fig. 5 - Hydrostructural maps – bottom aquifer system isobaths (a) and top interlayer isobaths (b), aquifer system isopachs (c) and interlayer isopachs (d).

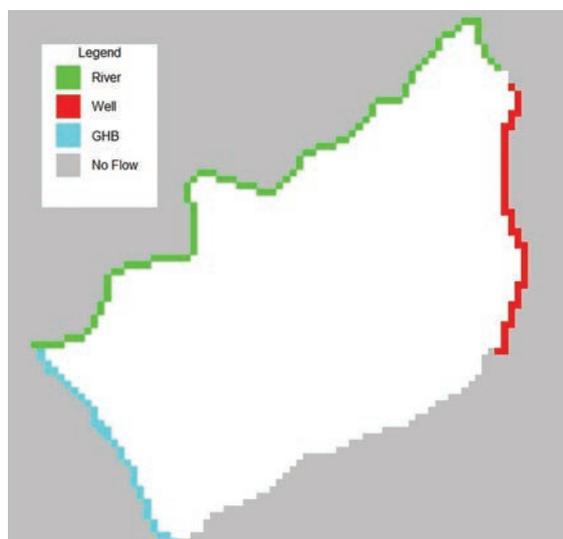


Fig. 6 - Condizioni al contorno.

Fig. 6 - Boundary conditions.

Sulla base del modello concettuale fin qui descritto, sono state dunque definite sia le condizioni al contorno, che delimitano orizzontalmente il sistema acquifero, sia la sua discretizzazione verticale.

Le condizioni al contorno (Fig. 6) sono rappresentate da:

- tre limiti aperti al flusso idrico con il fiume Cecina a Nord, il mare a ovest ed i rilievi collinari ad est;
- un limite a flusso nullo a sud, coincidente con lo spartiacque idrogeologico del Fosso le Basse.

Il fiume Cecina è stato modellizzato inizialmente utilizzando la condizione di carico imposto (*constant head*) e successivamente con la condizione di flusso dipendente dal carico mediante il *River package*, prendendo come riferimento iniziale per le quote idrometriche le registrazioni della stazione idrometrica della Steccaia, posta ai limiti del modello.

Per la condizione a mare è stata utilizzata inizialmente una condizione *constant head* sostituita poi da una condizione meno forte del terzo tipo per mezzo del pacchetto *General Head Boundary* (GHB) che distanzia in modo più realistico dal limite di costa del modello la quota imposta del carico idraulico pari a 0.

Non essendo l'area dei rilievi collinari ad est di interesse per la simulazione, si è scelto di simulare il contributo dato dalla ricarica zenitale all'acquifero in quell'area usando il "*Well Package*" con segno positivo.

I prelievi dai 46 pozzi sono stati assegnati generalmente in L4, con l'eccezione di alcuni pozzi che emungono dall'acquifero superficiale L2 nella zona in cui è presente la lente argillosa.

La condizione *general head boundary* del mare è stata imposta a tutti gli strati, mentre solo ad L1 è stata assegnata la condizione di *river* del Cecina. Ad L4 sono state imposte infine le condizioni *well* della ricarica dal settore collinare.

La conducibilità idraulica K degli strati modellati, trattandosi di un acquifero con presenza di intercalazioni che limitano lo spessore effettivo delle unità idrostatigrafiche, è stata calcolata soprattutto per il modello monostrato, come K media ottenuta a partire dai valori di K specifici degli strati acquiferi.

I residui per il modello monostrato calcolati su 24 punti di calibrazione, sono compresi tra -2.03 e 1.21 con media di -0.42 e media assoluta pari a 0.72 m.

Il modello multistrato fornisce valori solo leggermente migliorativi, con intervallo dei residui compreso tra 1.98 ed 1.26 , media -0.35 e media assoluta 0.7 .

Per le successive simulazioni è stato impiegato il modello monostrato, poiché il modello multistrato non dispone ancora di sufficienti dati piezometrici e di qualità dell'acqua differenziati per strato acquifero.

La simulazione del trasporto dei contaminanti, espressa in concentrazione mg/mc ($\mu\text{g/L}$) della sommatoria di PCE+TCE, ha richiesto la stima dei parametri dispersività e fattori di reazione (adsorbimento e decadimento) come richiesti dal codice MT3D riportati in Tab. 2.

Per quanto riguarda la dispersività, i valori indicati sono stati calcolati assumendo come scala del modello la distanza tra area sorgente e il più distante pozzo impattato di 3 km e stimando dai grafici riportati in Gelhar et al. (1992) una dispersività longitudinale di 100 m ed una dispersività trasversale pari a $\alpha T = \alpha L / 3$.

Per i fattori che intervengono nel processo di adsorbimento, si è fatto riferimento alla "*Subsurface Contamination Reference Guide*" (EPA, 1991) che riporta valori di $\log K_{oc}$ (coefficiente di ripartizione carbonio organico) di $2,82$ e $2,10$ per PCE e TCE rispettivamente, assumendo un coefficiente di ripartizione generale K_d pari a $0,07$ L/Kg con peso di volume di $1,8$ Kg/dmc.

Infine, per il fattore di emivita, è ripreso il valore mediano riportato da Newell et al. (2002) per TCE di 230 gg ($\lambda = 0,003$).

Si evidenzia che la simulazione in regime transitorio del trasporto dei contaminanti ha utilizzato come condizioni iniziali la distribuzione delle concentrazioni della fase disciolta del

Tab. 2 - Parametri per il modello di trasporto MT3D.

Tab. 2 - Parameters for the MT3D transport model.

Dispersività <i>dispersivity</i>		Fattori di Ritardo <i>Retardation factor</i>		Emivita <i>Half life</i>
Longitudinale αL	Trasversale αT	Peso di volume <i>Bulk density</i>	Coefficiente di ripartizione <i>Partition coefficient</i>	
[m]	[m]	[Kg/dmc]	[l/Kg]	[g]
100	10	1,8	0,07	230

contaminante. In via preliminare, nel modello monostrato, non è stata simulata la presenza di possibili accumuli locali in fase separata del contaminante.

Discussione

Il modello monostrato stazionario è stato impiegato per l'ottimizzazione della MISE. In particolare, come rappresentato in figura 7 (a-c), sono state ricostruite e confrontate le reti di flusso relative ai due scenari 2004-2012 (pozzi Giannelli e La Rapida - Fig.7a) e 2012-2013 (aggiunta di CD3 e CD4 - Fig.7b). Una diversa configurazione, ritenuta di maggiore efficacia, è stata proposta ed attuata a partire dal settembre 2013 (Fig.7c).

Il modello di trasporto relativo al transitorio 2005-2010, sebbene ancora ad un livello qualitativo che risente sia delle complesse condizioni di trasporto in fase separata tipica dei DNAPL, sia di una forte imprecisione nella realizzazione di una mappa continua delle concentrazioni, ha permesso

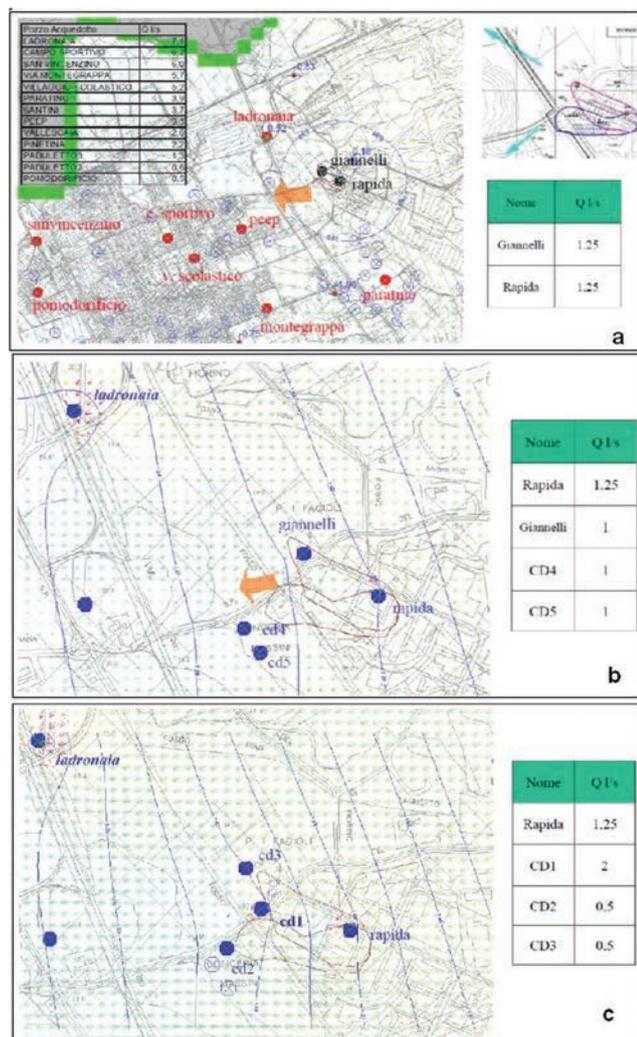


Fig. 7a,b,c - Scenari modellati in stato stazionario - a) MISE iniziale 2004-2012; b) MISE integrata 2012-2013; c) MISE proposta sulla base del modello.

Fig. 7a,b,c - Scenarios modeled in steady state - a) 2004-2012 initial MISE; b) 2012-2013 integrated MISE; c) proposal of MISE based on model results.

comunque di evidenziare il diverso comportamento dei due pozzi Peep e Ladronaia (Fig. 8 a-c). Il primo, infatti, posto alle spalle della MISE, nella direzione del flusso di falda, subisce un notevole incremento a partire dal 2008, anno particolarmente piovoso, nel quale il forte flusso di falda sembra aver ecceduto le capacità di contenimento della MISE. L'andamento del pozzo Ladronaia è invece opposto. Infatti questo pozzo, posto in direzione ortogonale al flusso di falda, sebbene mantenuto negli anni in forte pompaggio, come supporto alla MISE, mostra la sua maggiore efficacia nei primi anni fino al 2008, caratterizzati da deflussi assai scarsi.

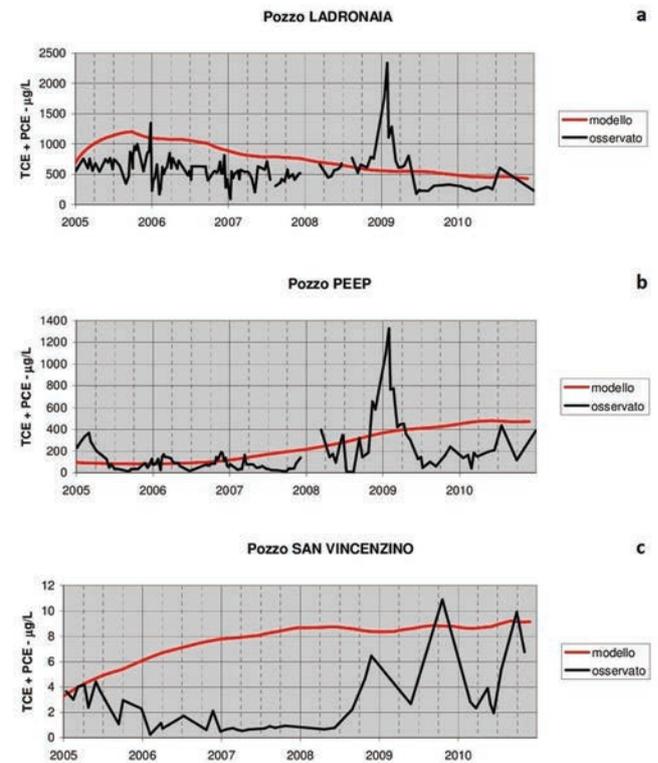


Fig. 8a,b,c - Concentrazioni PCE+TCE osservate e calcolate periodo 2005-2010 nei pozzi Ladronaia, Peep e San Vincenzino.

Fig. 8a,b,c - PCE+TCE observed and computed trends in 2005-2010 period in Ladronaia, Peep and San Vincenzino wells.

Il modello transitorio simulante il trasporto è stato inoltre utilizzato in modo predittivo, ricorrendo a due scenari di riferimento relativi ad anni idrologici tipo, di massimo e minimo afflusso, pari al 2008/2009 e 2005/2006 rispettivamente (Fig. 9 a-b).

L'intervento di ricondizionamento dei pozzi esistenti nell'area sorgente (previsto dal progetto di bonifica) ha determinato per il pozzo La Rapida, che in precedenza filtrava ambedue le falde, una veloce decrescita delle concentrazioni e dunque l'inopportunità di mantenere il sistema di *pump & treat*. La scelta di una riallocazione dell'impianto di pompaggio nei pozzi ancora disponibili (CD4, CD5) è stata valutata con ricorso al modello previsionale in stato transitorio tramite il "particle tracking" di MODPATH (Pollock 1989). La migliore localizzazione è apparsa quella del CD4, efficace sia nello scenario di minimo che di massimo afflusso (Fig. 10 a-b).

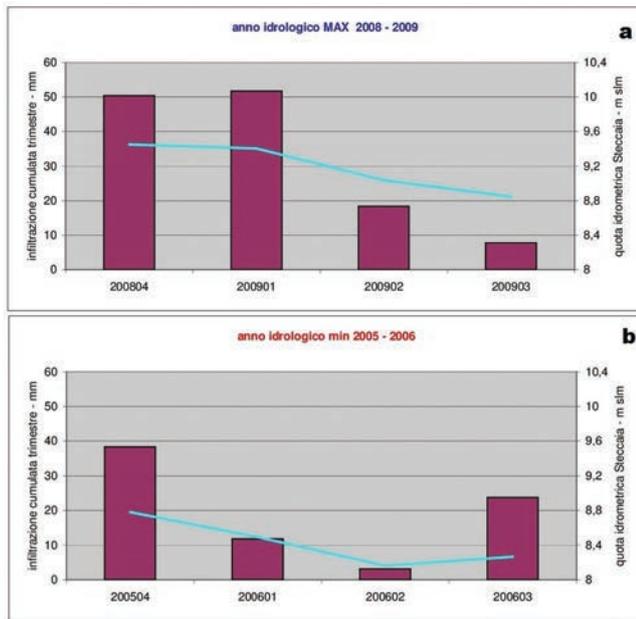


Fig. 9a,b - Scenari di riferimento con relative forzanti idrologico-idrauliche (fiume Cecina e ricarica) per agli anni idrologici tipo di massimo 2008-2009 (a) e di minimo 2005-2006 (b).

Fig. 9a,b - Reference scenarios with related hydrologic-hydraulic forcings (river Cecina and recharge) for hydrologic years of maximum 2008-2009 (a) and minimum 2005-2006 (b).

Conclusioni

Il lavoro svolto ha incrementato lo stato delle conoscenze sul sistema idrogeologico dell'acquifero costiero del Cecina e raggiunto un duplice obiettivo:

- l'ottimizzazione della barriera idraulica attraverso la scelta dei pozzi e la calibrazione delle portate;
- il supporto alle attività di monitoraggio per la piena comprensione e la capacità previsionale dei processi in atto.

La definizione del modello concettuale, condotta in condivisione con gli enti e soggetti preposti all'Accordo di Programma per l'attuazione degli interventi urgenti per la bonifica della falda acquifera, ha rappresentato una fase propedeutica molto importante per la successiva implementazione del modello numerico di flusso e trasporto.

Una prima simulazione di stato "naturale", in assenza di pompaggi, è stata condotta come verifica della consistenza dei dati processati e condizioni al contorno imposte. I successivi modelli in stato stazionario hanno invece fornito le prime tempestive indicazioni per l'ottimizzazione della MISE e confinamento del pennacchio.

Le ricostruzioni successive in stato transitorio e trasporto, relative al periodo 2005-2010, hanno mostrato un sufficiente accordo qualitativo tra dati calcolati ed osservati sui punti di calibrazione selezionati.

Per il modello in stato transitorio sono stati definiti due anni idrologici di riferimento, di minimo e massimo afflusso, sui quali effettuare simulazioni previsionali sia come supporto al monitoraggio annuale che per ulteriori necessità di ottimizzazione della barriera idraulica.

In conclusione il modello realizzato ha mostrato un sufficiente grado di affidabilità in termini di capacità di riproduzione delle condizioni reali. Un miglioramento delle capacità di simulazione sarà possibile mediante l'impiego della versione multistrato, quando saranno disponibili dati piezometrici e di concentrazione distinti per la prima e seconda falda, almeno nella zona sorgente, oggetto di una specifica campagna realizzata nel 2014.

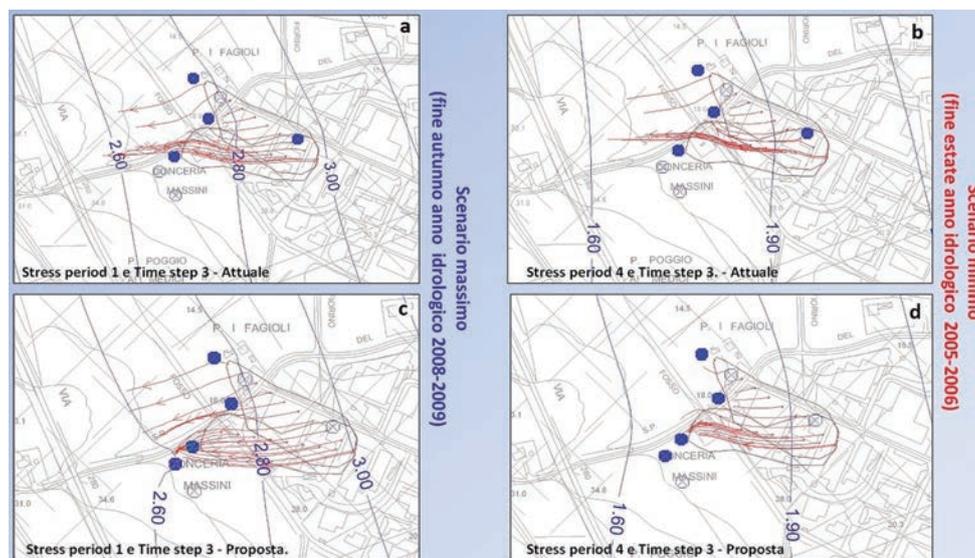


Fig. 10a,b,c,d - Scenari di riferimento per l'ottimizzazione della barriera idraulica: massimo (a) e minimo (b) attuale, massimo (c) e minimo (d) proposta.

Fig. 10a,b,c,d - Reference scenarios and provisional modeling for hydraulic barrier optimization: actual maximum (a) and minimum (b), proposal maximum (c) and minimum (d).

BIBLIOGRAFIA

- Ambrosio M. & Fagioli M.T. (2001): Modellazione e simulazione numerica in idrogeologia: esempio di applicazione alla pianura costiera di Cecina "Modelling in hydrogeology: example of application to the coastal plain of Cecina". *Acque Sotterranee*, n° 70 - Aprile 2001.
- ARPAT (2007). SIRA-DBGEO database. Agenzia Regionale di Protezione Ambientale della Toscana http://sira.arpato.toscana.it/sira/sira/SIRA_dbgeo.zip.
- ARPAT (2003). Studio idrogeologico con utilizzo di modelli numerici di simulazione per la definizione dei meccanismi d'arricchimento in nitrati delle acque sotterranee nell'area compresa tra gli stradoni del Lupo, del Tripesce, la SS. n° 206, Vada e S. Pietro in Palazzi - Relazione finale Gennaio 2003 "Hydrogeological study using groundwater modelling for the definition of the nitrate enrichment mechanisms in the area between the roads Lupo, Tripesce, SS. n° 206, Vada and S. Pietro in Palazzi" - Final report January 2013. http://www.provincia.livorno.it/fileadmin/Difesa_e_Protezione_del_Territorio/Arpat_20Relazione_20finale.pdf
- ARPAT (2013) Accordo di Programma per l'attuazione degli interventi urgenti per la bonifica della falda acquifera a seguito inquinamento da organoalogenati Comuni di Montescudaio (PI) e Cecina (LI) - Modello di Flusso e Trasporto. Relazione Finale Novembre 2013 "Program agreement to the urgent remediation of trichloroethylene and tetrachlorethylene contamination in the Cecina coastal aquifer - Groundwater Flow and Transport model - Final report November 2013. <http://www.arpato.toscana.it/documentazione/report/organoalogenati-modello-di-flusso-e-trasporto-nella-pianura-del-fiume-cecina>
- Barrauzoli P. Micheluccini M.; Salleolini M., Salvadori L. (1986). Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: 1) Applicazione del "metodo Kennessey" al bacino del Torrente Farma (Prov. di Siena e Grosseto) e sua verifica con i calcoli di bilancio "Evaluation of the water resources in southern Tuscany: 1) Application of the "method Kennessey" to the basin of the Torrente Farma (Prov. of Siena and Grosseto) and its control with the water balance". *Bollettino della Società Geologica Italiana* (ISSN:0037-8763) p. 333 - 350 Vol. 105.
- Benvenuti M., Bonini M., Moratti G., Ricci M., Tanini C. (2008). Tectonic and climatic controls on historical landscape modifications: The avulsion of the lower Cecina River (Tuscany, central Italy). *Geomorphology* 100 (2008) 269 - 284.
- Campo L., Caparrini F., Castelli (2006) Use of multi-platform, multi-temporal remote-sensing data for calibration of a distributed hydrological model: an application in the Arno basin, Italy, *Hydrol. Process.*, 20, 2693-2712, 2006
- Dominici S., Bartolini M., Benvenuti M., Balestra B. (2011) : Large kings with small crowns: a Mediterranean Pleistocene whale barnacle. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 50 (2), 2011, 95-101.
- EPA (1991). Subsurface Contamination Reference Guide. United States Office of Emergency and EPA/540/2-90/011- October 1991.
- Genovese N.A. (2003). Modellizzazione Numerica dell'Intrusione Salina nell'Acquifero Costiero della Valle del F. Cecina " Modelling of saltwater intrusion in the River Cecina coastal aquifer"; Università degli Studi di Roma la Sapienza Corso di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il territorio. Tesi di laurea anno accademico 2002/2003.
- Harbaugh A. W., McDonald M. D. (1996). User's documents for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite difference ground-water Flow model. U.S Geological Survey Open File Report 96-485.
- IGG-CNR-LAMMA (2009). Tuscany Groundwater Bodies. CNR Istituto Geoscienze e Georisorse Laboratorio Meteorologia e Modellistica Ambientale della Toscana. http://159.213.57.103/geoweb/ciss/CISS_DATI/32CT010_32CT030_32CT050.zip.
- Mazzanti, R. (1983). Il punto sul Quaternario della fascia costiera e dell'Arcipelago di Toscana "A review about the Quaternary of the Tuscany coastal and the its Archipelago". *Bollettino della Società Geologica Italiana* 102, 419-556.
- Newell C.J., Rifai H.S., Wilson J.T., Connor J.A., Aziz J.A., Suarez M.P. (2002). Calculation and Use of First-Order Rate Constants for Monitored Natural Attenuation Studies. EPA EPA/540/S-02/500. November 2002.
- Pollock, D.W. (1989). Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite difference ground-water model. United States Geological Survey Openfile Report 89-381.
- Pranzini G. (2003). Bilancio Idrogeologico del bacino del Fiume Cecina alla sezione di Ponte di Monterufoli "Water balance of the River Cecina at Monterufoli bridge section". Regione Toscana Dipartimento delle Politiche Territoriali ed Ambientali. Autorità di bacino Toscana Costa.
- Pranzini G. (2004). Studio idrogeologico del Bacino del Fiume Cecina "Hydrogeological study of the River Cecina". Regione Toscana Dipartimento delle Politiche Territoriali ed Ambientali. Autorità di bacino Toscana Costa.
- Rumbaugh J.O. and Rumbaugh D.B. (2007). GroundWaterVistas, Version 5, developed by Environmental Simulation, Inc. Reinhold Pennsylvania.
- Regione Toscana (2004) Accordo di programma per l'attuazione degli interventi urgenti per la bonifica della falda acquifera a seguito inquinamento da organoalogenati - Comuni di Montescudaio (PI) e Cecina (LI) - Approvazione "Program agreement to the urgent remediation of trichloroethylene and tetrachlorethylene contamination in the Cecina coastal aquifer - Acceptation". Decreto Presidente Giunta Regionale 363 del 12 novembre 2004.
- Zheng (1990). MT3D, A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Report to The U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada OK.