

L'ACQUIFERO FREATICO COSTIERO DELLA PIANURA DI PISA TRA FIUME ARNO E CANALE SCOLMATORE: IMPLEMENTAZIONE E CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

MICHELE AMBROSIO¹, CHIARA CURCIO², MARIA-TERESA FAGIOLI³, ROBERTO GIANNECCHINI⁴

ABSTRACT

The Pisa plain, encompassing the Arno and Serchio river estuaries, had been home for human settlements since early Neolithic. During the last two centuries, urban and industrial growth increased the water demand, while industrialization and intensive agriculture caused significant and invasive water pollution, reducing the availability of freshwater. Mechanical reclamation of coastal wetlands and uncontrolled pumping of wells near the coastline have in addition produced seawater intrusion to the unconfined aquifer.

Knowledge and government of water resource should certainly be a public main task: the present work is part of a Pisa Municipality wider project to preserve the unconfined coastal aquifer from seawater intrusion and other degradations. 3D

finite-differences numerical models were applied to the coastal unconfined aquifer, also zooming to the tourist villages of Marina di Pisa and Tirrenia.

A numerical flow model of the area between the Arno River to the North, Navicelli Canal to the East, Scolmatore Canal to the South and Ligurian Sea to the West, was implemented and calibrated (Wide Area Model - WAM) to provide boundary condition for the two local models of Marina di Pisa and Tirrenia.

Hydrostratigraphy, rainfall pattern, thermometry, water table trend, salinity and hydraulic parameters, head of surface water bodies of the unconfined aquifer are needed for numerical model implementation. Monthly water table and salinity surveys (from October 2007 to December 2009) together with acquisition, systematization and processing of bibliographic and new on-site data were carried out

1 Ambrosio Michele - AF Geoscience and Technology Consulting SRL -Via Toniolo, 222 56010 Campo (PI) - email: ambrosiom@afgtc.com

2 Curcio Chiara - AF Geoscience and Technology Consulting SRL - Via Toniolo, 222 56010 Campo (PI) - email: curcioch@afconsulting.it

3 Fagioli Maria Teresa - AF Geoscience and Technology Consulting SRL -Via Toniolo, 222 56010 Campo (PI) - email: fagiolimt@afconsulting.it

4 Giannecchini Roberto - Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, Via S. Maria 53, 56126 Pisa - email: rgianneccchini@dst.unipi.it



to improve a conceptual model, then translated into a constant density, large-scale numerical model of the WAM. On the contrary, Marina di Pisa and Tirrenia areas were implemented as variable-density models. All three models were calibrated and sensitivity parameters identified.

The local models outputs show a modest degree of direct marine intrusion near the shoreline. In the dune area to the West of Marina di Pisa, the seawater intrusion is reduced to a thin lamina below a thick freshwater saturated layer. Near Tirrenia, the unconfined aquifer is completely salty, showing high to very high salinity in the retrodune lagoons areas to the West.

This work is an exportable methodological example of numerical technique of seawater intrusion study suited for a quantitative anticipatory evaluation of the possible counteractions.

TERMINI CHIAVE: Idrogeologia, Intrusione marina, Modellazione numerica, Visual Modflow, Pianura costiera di Pisa.

KEYWORDS: *Hydrogeology, Seawater intrusion, numerical modelling, Visual Modflow, Pisa coastal plain.*

INTRODUZIONE

La pianura di Pisa, che contiene la parte terminale del corso dei fiumi Arno e Serchio, nonché il Canale Scolmatore, emissario dell'Arno, è stata sede di insediamenti umani e crocevia di comunicazioni fin dai tempi preistorici. I paleodelta e la fascia costiera sono caratterizzati da una grande varietà di ambienti naturali, profondamente modificati da attività antropica plurimillennaria. Le grandi opere di bonifica e di sistemazione idraulico-agraria, iniziate nel periodo romano-imperiale, hanno ridisegnato l'assetto idrologico naturale del quale oggi solo piccoli tratti sono direttamente riconoscibili.

Negli ultimi due secoli dell'evo moderno, i rapidi incrementi demografici, accompagnati dalla crescita dei centri urbani e delle attività produttive, hanno reso sempre più pressanti i relativi fabbisogni idrici da un lato e la domanda di superfici coltivabili dall'altro.

Per contro, l'accelerato sviluppo industriale e le nuove pratiche di fertilizzazione chimica introdotte in agricoltura hanno provocato, soprattutto negli ultimi decenni, gravi e diffusi fenomeni di inquinamento delle acque superficiali e sotterranee, riducendo drasticamente le disponibilità di risorse idriche di qualità. Estesi prosciugamenti meccanici ed irrazionali emungimenti in prossimità del litorale hanno, inoltre, innescato ulteriori fenomeni di degrado della qualità dell'acqua superficiale e sotterranea, dovuti all'intrusione di acque marine negli acquiferi costieri. A tutto ciò si deve poi aggiungere lo sviluppo turistico dell'area costiera, con conseguente aumento della domanda idrica, specialmente nella stagione estiva, ovvero quella maggiormente carente di ricarica. Pertanto, le falde freatiche superficiali, maggiormente vulnerabili, hanno subito un progressivo deterioramento della qualità delle acque, mentre si è intensificato lo sfruttamento di quelle confinate, a profondità crescenti, grazie al perfezionamento delle tecniche di perforazione dei pozzi. Attualmente, tuttavia, alla falda freatica attingono ancora, per ovvii motivi, gli stabilimenti balneari e diversi pozzi ad uso irriguo e domestico.

Il fenomeno dell'intrusione marina è stato accertato in molte aree costiere italiane (BARROCU, 2003) ed anche in Toscana sono state evidenziate situazioni di criticità legate alla salinizzazione delle falde (BARAZZUOLI et alii, 1999; GIMÉNEZ et alii, 2001; GRASSI et alii, 2007). La piana costiera versiliese-pisana non fa eccezione, come testimoniato anche dai lavori di ROSSI & SPANDRE (1994), PRANZINI (2002), DOVERI et alii (2009) e BUTTERI et alii (2010).

Il presente lavoro analizza con tecniche numeriche, sulla base di mirate campagne di misure piezometriche e di conducibilità elettrica, l'idrodinamica sotterranea dell'acquifero freatico costiero per riconoscere, individuare e quantificare le criticità di un'area fortemente antropizzata e con un equilibrio ambientale fortemente compromesso. Previa implementazione e calibrazione di un modello numerico di un'area più ampia (denominato per semplicità "modello di area vasta"), a densità

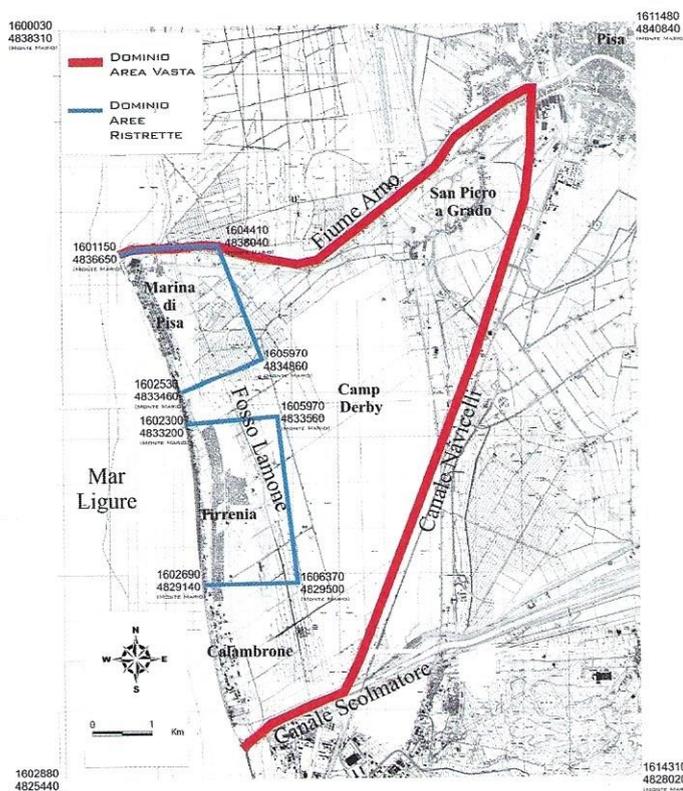


Fig. 1 - Estratto di Cartografia Tecnica Regionale con evidenziati i limiti dell'area vasta, delle aree ristrette e coordinate di riferimento dei limiti di dominio di studio per ognuno dei tre modelli realizzati.

Fig. 1 - Wide area boundaries, local areas boundaries and their coordinates on official Tuscany cartography.

costante (che ha fornito un quadro plausibile delle condizioni al contorno dell'area costiera) l'attenzione si è focalizzata su due dei principali centri abitati e turistici della zona (Marina di Pisa e Tirrenia), con l'implementazione di due modelli di dettaglio a densità variabile ("modelli di area ristretta"). Sia il modello di flusso per l'area vasta, che i modelli di area ristretta sono stati calibrati concentrando l'attenzione sulla vulnerabilità al fenomeno di ingressione marina.

I modelli calibrati costituiscono un esempio metodologico esportabile, finalizzato alla comprensione e alla quantificazione delle cause dell'ingressione marina ed alla produzione di simulazioni previsionali (scenari) in differenti condizioni di ricarica ed emungimento e composizionali quantitative ex ante delle tecniche di mitigazione del fenomeno.

INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

L'area vasta del modello numerico (Fig. 1) è situata lungo la fascia costiera della Toscana settentrionale e fa parte della pianura pisana.

La piana costiera pisana si prolunga verso nord-ovest nella piana Versiliese, a costituire il Bacino Pisano-Versiliese, depressione tettonica sviluppatasi a partire dalla fine del Miocene sup. (Tortoniano sup.-Messiniano inf.) per la presenza di faglie dirette che si mantennero attive almeno fino a tutto il Pleistocene inferiore (DELLA ROCCA et alii, 1987) (Fig. 1).

La piana attuale e i depositi più superficiali che la colmano, di età olocenica, si sono formati a seguito del progressivo accumulo dei sedimenti apportati principalmente dai fiumi Arno e Serchio. La fascia più esterna della piana dell'Arno costituisce un'estesa area di transizione tra l'ambiente marino e l'ambiente continentale alluvionale. L'area risulta complessivamente pianeggiante o caratterizzata da blande ondulazioni legate soprattutto alla presenza dei lidi e delle dune antiche e recenti. La debole pendenza dei depositi fluvio-palustri, corrispondente in media allo 0,05%, provoca, anche attualmente, nonostante le opere di canalizzazione e di bonifica effettuate nel corso dei secoli, vasti ristagni d'acqua, con predisposizione a formare nuove aree paludose. Tale difficoltà di drenaggio superficiale è accentuata verso il mare dallo sbarramento morfologico costituito dal sistema di dune litoranee, con quota topografica più elevata rispetto alla piana alluvionale.

L'idrogeologia della pianura è condizionata dalla vicinanza del mare, dalle cui variazioni di livello è regolata sia la dinamica delle acque superficiali e sotterranee, che la loro qualità. BALDACCI et alii (1994) e BALDACCI (1999) hanno riportato un'ampia descrizione del sistema idrogeologico della pianura pisana, di cui sono qui sintetizzati gli aspetti salienti. La potente successione sedimentaria della pianura alluvionale pisana rappresenta un Acquifero Multistrato Confinato (AMC), caratterizzato dalla presenza nei livelli più superficiali di depositi dotati di permeabilità primaria da bassa a molto bassa, e da livelli più fini limoso-argillosi, cui si intercalano



livelli a granulometria sabbioso-ghiaiosa a permeabilità da media ed elevata; a questi ultimi attingono i numerosi pozzi ad uso idropotabile, industriale ed irriguo. I depositi più superficiali hanno uno spessore variabile da 10 a 50 m e ospitano una falda freatica.

L'AMC presenta una notevole complessità, con singoli livelli acquiferi a continuità laterale variabile ed andamento spesso lenticolare. Il territorio della pianura di Pisa ha presentato fin dal passato, problemi di assetto idrologico e idraulico; infatti, a causa della presenza di vaste aree depresse con zone al di sotto del livello del mare, il deflusso generale delle acque verso il mare è sempre stato difficoltoso, con conseguenti ristagni e impaludamenti. L'incremento delle superfici perennemente emerse è stato ottenuto mediante arginatura degli adduttori idraulici principali (prevenzione delle esondazioni), innalzamento della quota topografica delle aree depresse (colmamento) e creazione di un reticolo drenante artificiale (taglio degli spartiacque dei micro-bacini endoreici ed agevolazione deflussi). In tempi più recenti l'allontanamento delle acque meteoriche è stato attuato mediante idrovore (bonifica meccanica), tecnica che ha prodotto l'emersione perenne anche di aree ben al di sotto del livello medio del mare. Tale intervento ha generato localmente l'inversione del gradiente idraulico naturale nell'acquifero freatico.

IL MODELLO CONCETTUALE

Il modello idrogeologico concettuale dell'area è stato elaborato a partire dalla ricostruzione della geometria dei principali orizzonti acquiferi, desunta dalle informazioni litostratigrafiche e geofisiche (tomografie elettriche) disponibili (Fig. 2). Successivamente, il modello è stato affinato mediante il rilevamento diretto con cadenza mensile (da gennaio 2008 a dicembre 2009) dei livelli freatici e dei dati conducimetrici dell'acqua di falda e dei corpi idrici superficiali su una rete di punti di misura in parte appositamente realizzati dal Comune di Pisa ed in parte costituita da numerosi pozzi, per la maggior parte di tipo romano, presenti nell'area. La modellazione litostratigrafica di dettaglio si è

limitata all'acquifero freatico, ma si è comunque provveduto ad una preliminare ricostruzione dei principali orizzonti confinati, in vista di una potenziale futura estensione della modellazione agli acquiferi profondi. I dati litostratigrafici puntuali sono stati correlati costruendo una maglia larga di sezioni con ubicazione ed orientazione vincolata ad ubicazione e densità dei dati disponibili. La ricostruzione idrostratigrafica è stata integrata anche con i risultati di una serie di tomografie elettro-resistivimetriche 2D.

Dai dati disponibili, è emerso un modello idrogeologico concettuale con un acquifero freatico contenuto nei depositi sabbiosi superficiali, di spessore di circa 10-15 m, a ricarica prevalentemente meteorica, che si ispessisce leggermente sulla fascia dunale costiera, debolmente interagente con fiumi e canali. Al di sotto dell'orizzonte freatico si ubica un livello prevalentemente impermeabile, dotato di una certa continuità, con intercalati acquiferi confinati organizzati in corpi più o meno discontinui di origine fluviale, con ricarica prevalentemente laterale, dai margini della pianura, e localmente per drenanza dall'acquitardo che li confina.

Il modello concettuale è stato quindi utilizzato per l'implementazione in un modello numerico a differenze finite. Per ciascuno degli abitati di Marina di Pisa e Tirrenia (aree ristrette) sono stati implementati dettagliati modelli numerici di flusso a densità variabile per lo studio dell'intrusione salina. Le condizioni al contorno necessarie per il corretto funzionamento dei due modelli locali sono state ricavate implementando un modello idrogeologico di area vasta (area compresa fra Fiume Arno a nord e Canale Scolmatore a sud e fra Mar Ligure ad ovest e Canale Navicelli ad est). Per la modellazione di area vasta è stato utilizzato il software a differenze finite (Visual Modflow 4.2) specifico per il calcolo del flusso a densità costante con codice di calcolo Modflow, mentre per le aree ristrette è stato utilizzato il codice di calcolo Seawat, a densità variabile, idoneo per l'analisi del fenomeno dell'intrusione marina.

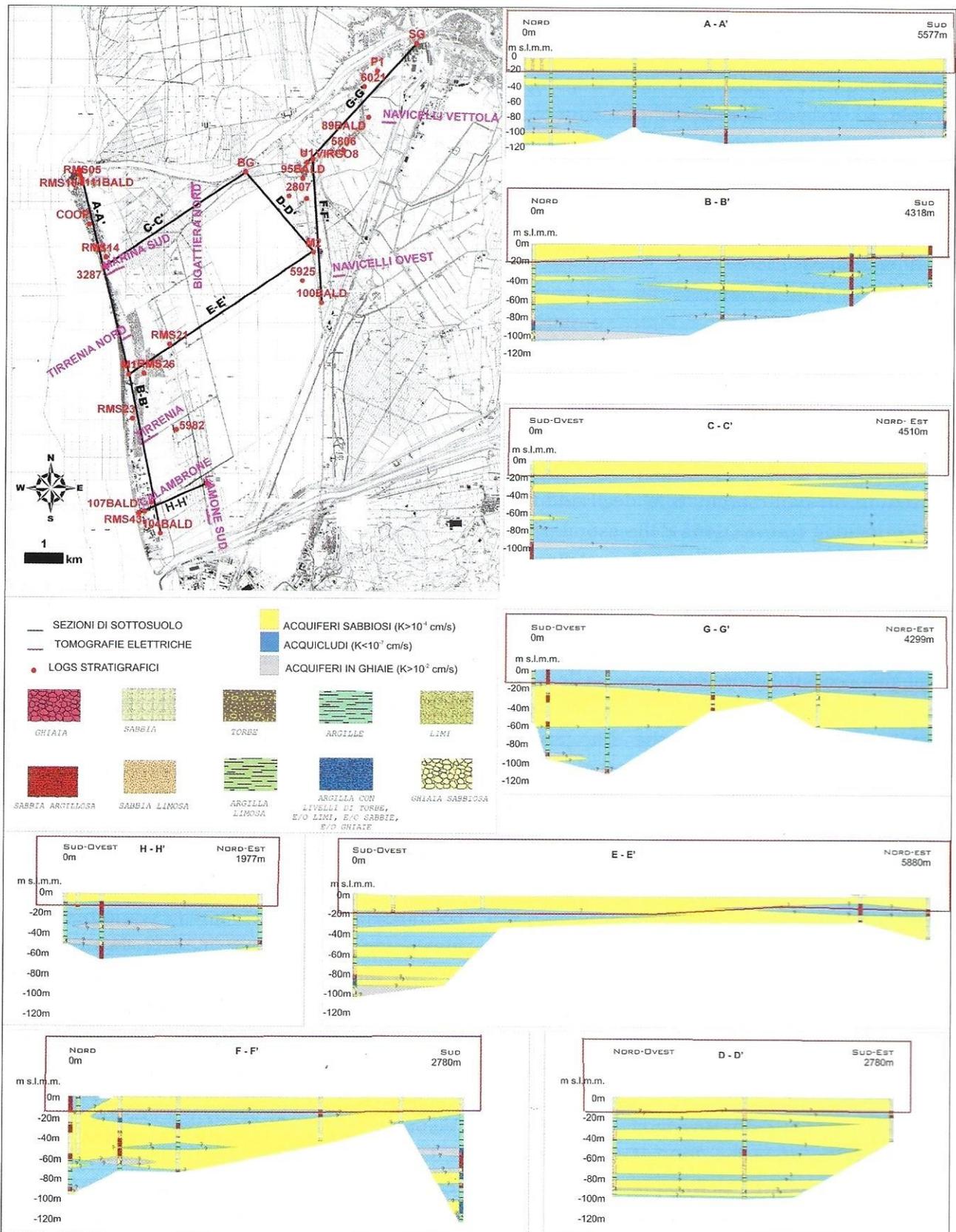


Fig. 2 - Ricostruzione delle sezioni idrostratigrafiche sulla base di logs litostratigrafici e tomografie elettriche. Nella mappa è riportata anche l'ubicazione dei logs stratigrafici utilizzati per la ricostruzione delle sezioni di sottosuolo.
 Fig. 2 - Hydrostratigraphic sections of the study area based on lithostratigraphic logs and electrical resistivity tomographies. Also shown the stratigraphic surveys used for sections.



MODELLO DI FLUSSO A DENSITÀ COSTANTE ("AREA VASTA") E MODELLI DI FLUSSO A DENSITÀ VARIABILE ("AREE RISTRETTE")

La trasformazione di ogni realtà fisica in un modello numerico di calcolo comporta l'accettazione di una serie di ipotesi semplificative, la cui entità ed importanza è inversamente proporzionale alla quantità, omogeneità di distribuzione e qualità dei dati disponibili sulle grandezze in gioco. La modellazione idrogeologica numerica supera la tipica limitante ipotesi deterministica del mezzo omogeneo isotropo, consentendo di assegnare, a differenti porzioni del volume di sottosuolo di interesse, differenti valori per le proprietà idraulicamente significative.

Per l'analisi delle problematiche idrogeologiche dell'area vasta è stata scelta l'implementazione di un modello di flusso a densità costante a differenze finite con Visual Modflow 4.2®, motore di calcolo Modflow (TRESCOTT & PETER, 1975; TRESCOTT et alii, 1976).

Nel metodo delle differenze finite, il sistema continuo reale è simulato da una serie finita di volumi discreti nello spazio (celle) studiati per sequenze di intervalli temporali (Stress Periods). L'espressione matematica alla base del metodo (equazione di continuità) stabilisce che la somma di tutti i flussi in ingresso ed in uscita dalle celle deve essere uguale alla variazione di volume di acqua contenuta nelle celle stesse (storage), in pratica ciascuna maglia di Modflow rappresenta un volume elementare (Volume Elementare Rappresentativo - REV) dove la differenza infinitesima, ∂x , dell'equazione di continuità, viene sostituita con una differenza finita (misurabile), Δx .

Mediante tecnica di calcolo iterativo, il modello produce una matrice tridimensionale dei valori del carico idraulico cella per cella. La calibrazione, ovvero la verifica della rispondenza dei risultati calcolati alla realtà fisica e la conseguente correzione dell'implementazione, consente di mitigare gli effetti delle incertezze dovute a carenza e disomogenea distribuzione dei dati nello spazio e nel tempo. Si ottiene così un modello in grado di simulare, con grado di attendibilità noto, il sistema fisico reale, di

fornire un'informazione semi-quantitativa sui valori dei parametri di input che non era stato possibile ottenere in modo deterministico.

Il motore numerico Seawat, utilizzato per i modelli di flusso a densità variabile delle aree ristrette di Marina di Pisa e Tirrenia, permette di simulare in 3D i flussi di acqua sotterranea con densità del fluido non costante (BEAR & VERRUIJT, 1987). Ciò permette quindi di poter considerare in maniera più precisa la miscelazione tra acque dolci e salate, ovvero il fenomeno dell'intrusione marina. Il concetto alla base del motore Seawat è quello di combinare il codice di calcolo Modflow per il flusso con quello di trasporto soluti MT3DMS, per dar luogo ad un unico modulo che risolve insieme le equazioni di flusso e trasporto, formulate in modo da conservare, a differenza di quanto avviene con Modflow, la massa e non il volume.

Nella simulazione combinata di flusso e trasporto di un fluido a densità variabile e quindi nel calcolo numerico dell'equazione, la densità del fluido è considerata dipendente solo dalla concentrazione del soluto e non da pressione o temperatura: nel caso di simulazione dell'intrusione salina in aree a clima mediterraneo prive di rilevanti anomalie geotermiche, questa semplificazione non comporta errori significativi.

IL MODELLO DI "AREA VASTA"

Il modello concettuale di area vasta, come accennato in precedenza, ha riguardato l'area compresa fra F. Arno, C. Scolmatore, C. Navicelli e mare. La simulazione del flusso in regime transitorio è impostata su una serie di periodi (Stress Periods) all'interno di ciascuno dei quali emungimenti, ricarica ed evapotraspirazione possono considerarsi costanti (stress esterni costanti), ma variano in genere da uno Stress Period all'altro. La simulazione è stata fatta partire tre mesi prima dell'inizio delle campagne di misura per minimizzare le distorsioni derivanti dalla situazione piezometrica iniziale arbitrariamente imposta con soggiacenza uniforme pari a 0,75 metri.

Il dominio di modellazione (Fig. 3) tracciato su cartografia tecnica digitale (C.T. Regione Toscana

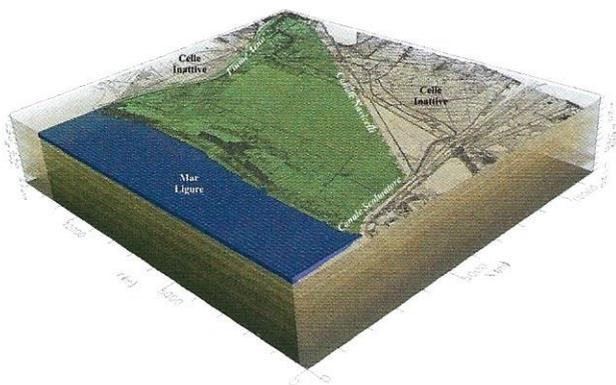


Fig. 3 - Il dominio di modellazione con evidenziazione della discretizzazione spaziale. In grigio le celle inattive (rapporto di scala orizzontale/verticale: 1:20).

Fig. 3 - Modelling domain. The spatial discretization is highlighted; the inactive cells are in grey (horizontal/vertical scale ratio: 1:20).

1:10.000) è stato importato con asse Y in direzione Nord, come mappe di background in Visual Modflow. I limiti del volume attivo di modellazione sono stati tracciati in corrispondenza di corpi idrici superficiali significativi simulabili con le funzioni River (R) e Constant Head (CH) per semplificare le relazioni tra l'area modellata e le zone esterne circostanti. In particolare, Fiume Arno, Canale Navicelli e Canale Scolmatore sono stati implementati come River, mentre il mare è stato considerato una Costant Head a quota assoluta 0 m per tutto il periodo di simulazione.

L'altimetria digitale delle terre emerse è stata ricavata dai dati del rilievo laser scanner effettuati dal Comune di Pisa e disponibili per l'intera area di studio, mentre per il fondo marino si è fatto ricorso alle sezioni batigrafiche rilevate dalla Provincia di Pisa, integrate con i dati della cartografia nautica di dettaglio. Le celle esterne all'area di interesse come sopra definita sono state implementate inattive, escludendole di fatto dal calcolo numerico.

Il dominio di modellazione è stato discretizzato sul piano XY in 135 righe e 115 colonne considerando gli infittimenti locali della griglia in corrispondenza delle aree dove era richiesto un maggiore dettaglio. Per la discretizzazione verticale sono stati implementati 11 layers. Sono stati accorpati orizzonti e depositi a comportamento idrogeologico simile, riconducendo i litotipi sotterranei a tre

categorie principali: acquicludi, acquiferi in sabbie ed acquiferi in ghiaie. Il corpo idrico libero "mare" è stato simulato con caratteristiche idrauliche "sintetiche" atte a riprodurre la capacità di cessione-assorbimento praticamente infinita e l'assenza di uno scheletro solido. Per consentire, ove i dati lo permettevano, un affinamento locale ed una differenziazione, anche all'interno di ciascuna delle classi sopra indicate, il numero dei layers è stato mantenuto più elevato di quanto strettamente indispensabile. Il successivo raffittimento dei layers e l'implementazione delle superfici di contatto tra layers è stato effettuato sfruttando i dati derivanti dalle sezioni stratigrafiche a base del modello concettuale. Con ciò nell'implementazione sono state introdotte le eteropie litologico-idrauliche dell'intero spessore di sedimenti modellato.

E' doveroso sottolineare che per la non trascurabile porzione di territorio occupato, fin da circa la metà secolo scorso, dall'installazione militare statunitense di Camp Darby, non sono disponibili dati stratigrafici, idrogeologici ed idraulici, per cui la ricostruzione del sottosuolo di questa zona è basata unicamente sull'interpretazione della storia geologica della Pianura di Pisa (BALDACCI et alii, 1994; BALDACCI, 1999), con un margine di indeterminatezza stratigrafico ed idrogeologico non trascurabile.

Per la discretizzazione temporale (Tab. 1), la simulazione è stata effettuata con Stress Periods corrispondenti a stagioni standard, trimestrali, omogenee dal punto di vista degli stress esterni antropici e meteo-climatici, a partire dall'inizio delle

Mesi	Stress periods (giorni)
Ott-Nov-Dic 07	0-92
Gen-Feb-Mar 08	92-183
Apr-Mag-Giu 08	183-274
Lug-Ago-Sett 08	274-366
Ott-Nov-Dic 08	366-458
Gen-Feb-Mar 09	458-548
Apr-Mag-Giu 09	548-639
Lug-Ago-Sett 09	639-731
Ott-Nov-Dic 09	731-823

Tab. 1 - Suddivisione degli intervalli di modellazione
Tab. 1 - Modelling times.

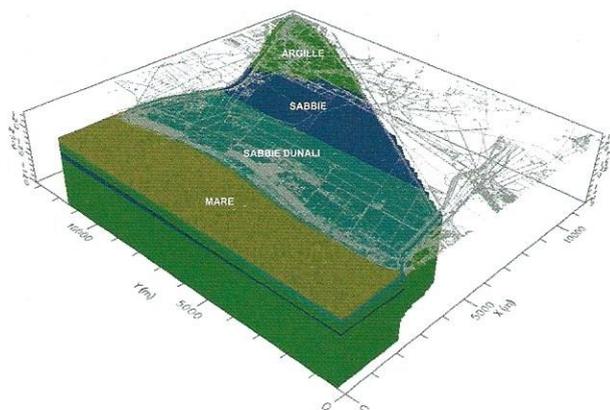


Fig. 4 - Distribuzione delle proprietà idrauliche (rapporto di scala orizzontale/verticale: 1:20).

Fig. 4 - Hydraulic properties distribution (horizontal/vertical scale ratio: 1:20).

attività di monitoraggio (gennaio 2008).

Le proprietà idrauliche attribuite alle singole celle del dominio (coefficienti parziali di permeabilità K_x , K_y e K_z , Specific Storage, Specific Yield (BEAR, 1972; FREEZE & CHERRY, 1979), Porosità Totale n_t e Porosità Efficace n_e) sono state assegnate sia dai rilievi diretti in sito (prove di permeabilità mediante slug test), sia da documentazione tecnica relativa a prove di emungimento eseguite nell'area e sono riportate in figura 4. Per quanto riguarda i sedimenti di tipo prevalentemente fluviale (sia di alveo, che di esondazione) e marino, si è considerato che i depositi, per le loro modalità deposizionali, possiedano una permeabilità verticale globale nettamente più ridotta di quella orizzontale che a sua volta è stata assunta, in assenza di dati reali, uguale nelle direzioni X e Y. Per le sabbie dunali, la conducibilità idraulica è stata assunta isotropa. I valori iniziali assegnati sono stati quindi affinati durante la fase di calibrazione del modello numerico. La proprietà identificata come "mare" è un "escamotage" modellistico per rappresentare un corpo idrico che interagisce liberamente con gli acquiferi in continuità idraulica con esso. La distribuzione delle proprietà idrauliche sullo strato più superficiale e sul piano XZ è mostrata in figura 4. La funzione Boundary (condizioni al contorno) nel software di modellazione permette di considerare gli afflussi dalle aree esterne al dominio (User's Manual for Visual Modflow). Per il presente modello

sono state utilizzate le funzioni Constant Head (CH), River (R) e Drain (D) (Fig. 5).

Come già ricordato in precedenza, la porzione di area del dominio occupata dal mare è stata modellata come Costant Head, assegnando il valore di head pari a 0 per l'intera durata della modellazione.

Con la funzione River (User's Manual for Visual Modflow) sono stati implementati i seguenti corpi idrici superficiali: Fiume Arno, Canale dei Navicelli e Canale Scolmatore.

Ad ogni cella implementata come River è stato assegnato, da letteratura, un valore di conduttanza pari a 500. Data l'ovvia incertezza attribuibile a questo valore, il valore C dei River è stato quindi considerato come parametro da verificare ed affinare in fase di calibrazione.

Il Fiume Arno è stato implementato considerando 11 tratti omogenei. Per ogni tratto la quota del fondo (RB) è stata ricavata dalle sezioni batigrafiche dell'alveo dell'Arno. Dalla foce verso est: -4.4, 5.0, -3.8, -4.7, -2.7, -3.4, -5.2, -4.4, -5.1, -4.3, -5.2 m s.l.m.m. Sia lo spessore dei sedimenti di fondo del fiume che la loro permeabilità K_z non erano disponibili, ma sono stati ipotizzati rispettivamente pari a 1 m e 10^{-6} cm/s sulla base di alcune indicazioni emerse dagli enti preposti alla gestione. Come Stress Periods sono stati considerati i seguenti intervalli di tempo: 0 (1 ottobre 2007) - 92 giorni, 92-183, 183-274, 274-366, 366-458, 458-548, 548-639, 639-731, 731-823 giorni.

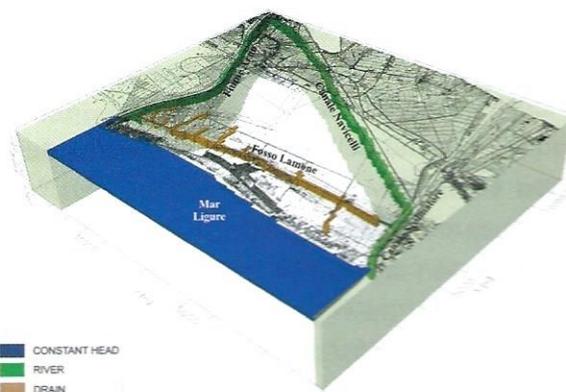


Fig. 5 - Distribuzione delle condizioni al contorno (rapporto di scala orizzontale/verticale: 1:20).

Fig. 5 - Boundary conditions (horizontal/vertical scale ratio: 1:20).

Per quanto riguarda il parametro RS, sono state considerate le altezze idrometriche misurate in corrispondenza delle stazioni idrometriche di Bocca d'Arno e Pisa Sostegno fornite dal Servizio Idrologico Regionale. Per ogni periodo di modellazione il valore di RS è stato ottenuto come media dei dati giornalieri per il relativo periodo.

Il Canale dei Navicelli è stato implementato considerando due tratti omogenei; per ogni tratto, la quota del fondo (RB) è stata fornita dalla Società Navicelli SPA. In particolare, procedendo da Pisa verso il Canale Scolmatore i valori di RB risultano -3.0 m s.l.m.m. e -2.5 m s.l.m.m. Lo spessore dei sedimenti è stato ricavato da alcune prospezioni geofisiche eseguite direttamente sul canale ed è risultato mediamente pari a 0.2 m. La permeabilità Kz non era nota, ma sulla base del tipo di sedimento è stata assunta pari a 10^{-7} cm/s. Le altezze idrometriche sono state assunte coincidenti al livello del mare (0 m s.l.m.m.).

Come Stress Periods sono stati considerati i seguenti intervalli di tempo: 0 (1 ottobre 2007) -92 giorni, 92-458, 458-823.

Il Canale Scolmatore è stato implementato mediante tre tratti omogenei. La quota di fondo RB è stata calcolata come media delle misure ricavate dalle sezioni fornite dal Consorzio di Bonifica "Ufficio dei Fiumi e Fossi" di Pisa. Da ovest verso est: tratto 1 = -1.0 m s.l.m.m., tratto 2 = -2.9 m s.l.m.m., tratto 3 = -1.8 m s.l.m.m.

Anche in questo caso, spessore dei sedimenti di alveo e loro permeabilità Kz non erano noti e, su dati di letteratura, sono stati assunti pari a 1 m e 10^{-7} cm/s, rispettivamente.

In considerazione dell'assetto morfologico del corso d'acqua e in analogia con il Canale dei Navicelli, anche in questo caso le altezze idrometriche sono state assunte coincidenti al livello del mare (0 m s.l.m.m.). Gli Stress Periods sono risultati i seguenti: 0 (1 ottobre 2007) - 92 giorni, 92-458, 458-823.

La funzione Drain (User's Manual for Visual Modflow) ha consentito di implementare il reticolo scolante afferente agli impianti di sollevamento della bonifica meccanica che, ancorché realizzati principalmente per il rapido allontanamento delle acque meteoriche

a prevenzione e contrasto della naturale tendenza all'impaludamento e sommersione della fascia retrodunale depressa, svolgono comunque anche la concomitante funzione di abbattimento della

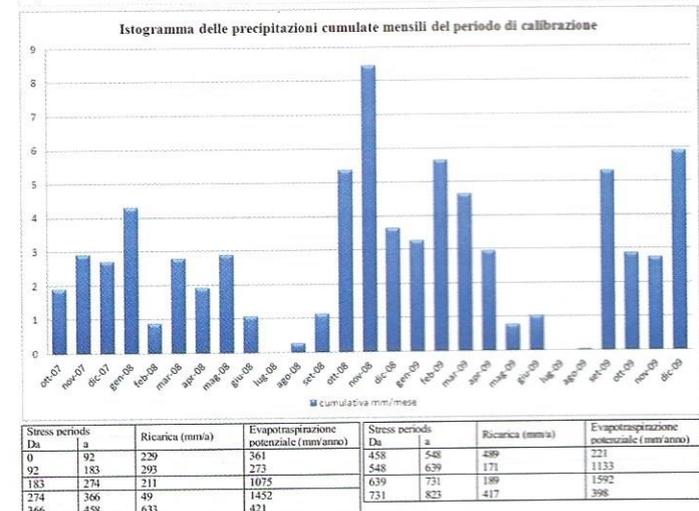
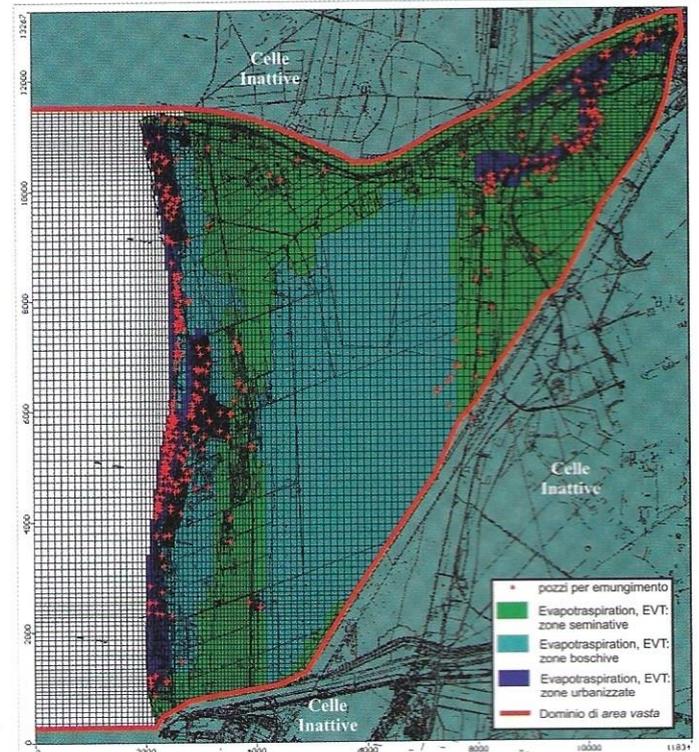


Fig. 6 - Rappresentazione dei fattori esterni di stress: in mappa la distribuzione dei pozzi di emungimento e la zonazione dell'evapotraspirazione (aree seminative, boschive, urbanizzate); istogramma delle precipitazioni cumulate mensili nel periodo di calibrazione e valori ricalcolati su base annuale di ricarica ed evapotraspirazione potenziale.

Fig. 6 - External stress factors: pumping wells and evapotranspiration zones (arable, woodland, urban), monthly precipitation histogram through the calibration and annual recharge and potential evapotranspiration.



superficie freatica. La funzione Drain rimuove l'acqua ad una velocità proporzionale alla differenza fra il livello piezometrico e la quota assoluta del drenaggio e non ha effetto al di sotto di tale quota. Il Drain differisce dal River in quanto ha solo potenzialità di ablazione di acqua, ma non di apporto. Con questa funzione è stato implementato il Canale Lamone ed alcuni canali secondari.

La quota di fondo del Canale Lamone è stata calcolata come media delle misure ricavate dalle sezioni fornite Consorzio di Bonifica "Ufficio dei Fiumi e Fossi" di Pisa. Sono stati implementati 10 tratti, nella direzione da Arno a Scolmatore con le seguenti quote: -1.8, -1.7, -1.6, -1.5, -1.4, -1.3, -1.5, -1.6, -1.9, -2.3 m s.l.m.m. La conduttanza è stata assunta anche in questo caso pari a 500, mentre per gli Stress Periods sono stati considerati i seguenti intervalli di tempo: 0 (1 ottobre 2007) -92 giorni, 92-458, 458-823.

Gli altri elementi significativi della rete di bonifica minore sono stati considerati come drenaggi con le quote ricavate dai livelli del piano campagna dei pozzi vicini e conduttanza pari a 500.

I principali stress esterni (User's Manual for Visual Modflow) sono la ricarica meteorica, l'evapotraspirazione ed i pozzi per emungimento (Fig. 6).

La ricarica meteorica (Recharge, RCH) tiene conto delle piogge cadute all'interno dell'area di modellazione per ogni Stress Period (User's Manual for Visual Modflow). Pertanto, per la loro quantificazione sono stati raccolti, presso il Servizio Idrologico Regionale, i dati pluviometrici giornalieri (dal 1 ottobre 2007 al 21/1/2010) relativi alle stazioni di Bocca d'Arno, Coltano e Livorno; per la stazione di Pisa i dati sono stati forniti dal Servizio Agro-Meteorologico ARSIA Regione Toscana. Successivamente, è stata calcolata la media delle cumulate dei valori delle precipitazioni per gli Stress Periods sopra identificati, considerando un coefficiente di infiltrazione efficace del 40% desunto da dati di letteratura.

Il valore della ricarica è stato assegnato uniformemente a tutta la superficie del primo strato, assumendo che all'interno del dominio le

piogge fossero distribuite in maniera omogenea, approssimazione ragionevole viste le differenze minime di quota topografica dell'area e le sue dimensioni contenute.

L'evapotraspirazione (Evapotranspiration, EVT) è stata calcolata (User's Manual for Visual Modflow) utilizzando i valori giornalieri (periodo 1 ottobre 2007 - 21/1/2010) relativi al coefficiente di irraggiamento (dati da letteratura) e quelli di temperatura media giornaliera (Servizio Idrologico Regionale di Pisa per le stazioni di Bocca d'Arno, Coltano, Pisa e dal Servizio Agrometeorologico ARSIA della Regione Toscana per le stazioni di Metato e Collesalveti) utilizzando la formula di THORNTHWAITE (1948).

L'evapotraspirazione potenziale EVT agisce su una porzione di terreno che corrisponde alla profondità degli apparati radicali della vegetazione di una determinata area. Modflow tiene conto dell'azione dell'evapotraspirazione reale solo se la profondità delle radici intercetta la superficie piezometrica, senza tener conto dell'esistenza della zona vadosa né della capacità di campo del suolo. In funzione dello spessore saturo del volume ipogeo interessato da apparati radicali, il motore di calcolo modula la percentuale di evapotraspirazione reale possibile rispetto alla EVT implementata. Il fenomeno si considera arrestarsi al raggiungimento di una specifica profondità di estinzione (Extinction Depth), che simula la profondità teorica, rispetto al piano campagna, degli apparati radicali della vegetazione. Per la modellazione in oggetto, si è tenuto conto di tre aree a differente profondità di estinzione, definite sovrapponendo la carta topografica all'ortofotopiano: aree urbanizzate (0,3 m), aree boschive (4 m) ed aree seminate (1 m).

Uno dei dati di maggior incidenza sulla effettiva veridicità di un modello idrogeologico numerico è certamente legato alla conoscenza dei quantitativi di acqua emunti (Pumping Wells) per i vari scopi (idropotabile, agricolo, industriale, domestico, in ordine di incidenza) (User's Manual for Visual Modflow). I dati sui pozzi attivi nell'area sono stati ricavati dal database della Provincia di Pisa (pozzi ad uso igienico, irriguo, industriale e domestico) per la cui distribuzione si veda la figura 6 e 7.

Limitatamente al dominio di modellazione non sono presenti invece pozzi ad uso idropotabile, che generalmente assumono grande importanza nel bilancio idrico di un'area, come manifestato, ad esempio, dalle criticità idriche della piana di Lucca (AMBROSIO et alii, 2009).

In assenza di dati specifici sugli emungimenti, si è considerato, in prima approssimazione, che i pozzi agricoli fossero attivi solo da giugno fino a settembre, con un valore di emungimento corrispondente alla quantità giornaliera (m³/giorno) riportata dalle concessioni. I pozzi ad uso industriale sono stati considerati sempre attivi, con entità di emungimento come da database della Provincia di Pisa. Per quanto riguarda la profondità dei filtri, laddove non si avevano dati certi, il filtro è stato posto alla profondità del livello più permeabile intercettato.

“RUN”E CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Il Run del modello comporta il procedere con il calcolo e la risoluzione dell'equazione di continuità per ogni cella del sistema (con esclusione delle celle non attive) e per l'intero periodo di osservazione, a partire da una situazione iniziale prefissata (User's Manual for Visual Modflow). Al termine del calcolo ne derivano, per ogni Stress Period ed ogni Time Step, degli scenari piezometrici ed i relativi bilanci idrogeologici. Come carico idraulico iniziale al tempo 0, ovvero 90 giorni prima della prima campagna di rilevamento, è stato assegnato un valore di -75 cm dal piano campagna, ampiamente al di sopra del livello piezometrico reale. Come metodo iterativo è stato utilizzato il metodo SIP (Strongly implicit procedure), motore numerico di risoluzione che ha offerto un risultato accettabile con il minor tempo di calcolo.

La calibrazione è la fase più delicata della creazione del modello numerico; in questo passaggio, infatti, si correggono gli iniziali dati di input caratterizzati da maggiore incertezza, in modo da avvicinare statisticamente il risultato calcolato dal modello numerico a quello misurato tramite le campagne di misura piezometriche (User's Manual for Visual Modflow), memorizzato nel modulo relativo ai pozzi di osservazione (Head Observation Wells).

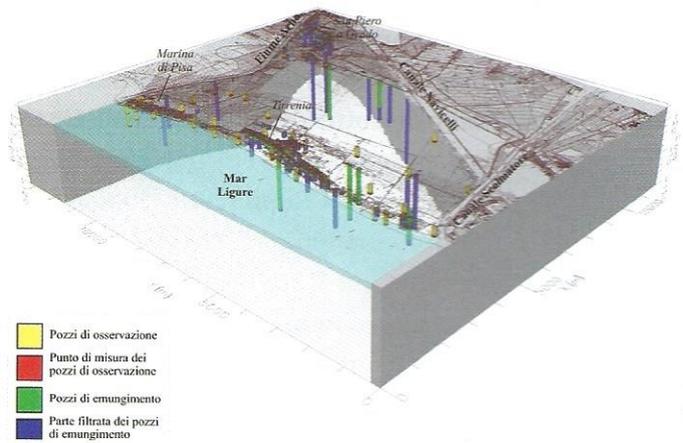


Fig. 7 - Distribuzione dei pozzi di emungimento (Pumping Wells) (in verde, filtri in blu) e dei pozzi di osservazione (in giallo, punto di misura in rosso).

Fig. 7 - Distribution of the pumping wells (green) with their respective screens (blu) and of the observation wells (yellow) with their respective measurement points (red).

L'ubicazione dei pozzi di osservazione, ovvero quei punti d'acqua (pozzi, piezometri, ecc.) dai quali sono stati ricavati i valori reali dell'altezza piezometrica misurati, con cadenza circa mensile, in sito (Fig.7), sono stati forniti dal Comune di Pisa. I punti di misura corrispondono ai piezometri situati lungo la fascia costiera e ai pozzi monitorati nella zona di San Piero a Grado, ed a pochi altri disponibili per l'entroterra.

Le modifiche ai dati di input sono state eseguite all'inizio manualmente, per tentativo ed errore, in modo da eliminare le discrepanze macroscopiche, ed in seguito in modo automatico utilizzando l'apposito codice di calcolo WinPest.

Per calibrare il modello e valutare la bontà della simulazione, Modflow mette a disposizione una serie di diagrammi (Fig. 8 a,b,c,d):

- grafici a dispersione calcolato-osservato (Fig. 8a);
- istogrammi residuali di calibrazione (Fig. 8b);
- piezogrammi calcolati e valori puntuali osservati - tempo (Fig. 8c);
- RMS-tempo (Fig. 8d).

Il grafico a dispersione e gli istogrammi residuali, per la simulazione con flusso transiente, permettono di valutare la variazione dell'errore nel tempo. In particolare, il grafico a dispersione (Fig. 8a), per ogni



punto di osservazione e per ogni momento, permette di valutare quali siano gli Head Observation Wells o i gruppi di questi che sono affetti da un errore maggiore e come questo varia nel tempo. Se i valori del calcolato e dell'osservato per ciascun pozzo fossero uguali, il punto corrispondente sul grafico si troverebbe esattamente sulla retta a 45° passante per l'origine (User's Manual for Visual Modflow). Il grafico relativo all'istogramma residuale (Fig. 8b) mostra invece la distribuzione statistica dei residui dopo la calibrazione al termine di ciascun Stress Period. I piezogrammi dei valori calcolati e valori puntuali osservati-tempo (Fig. 8c) consistono in una serie di correlazioni per singoli pozzi o per gruppi tra le variazioni nel tempo, i valori calcolati dal modello ed i rispettivi valori osservati in campagna. Infine, il grafico di calibrazione di figura 8d indica il variare nel tempo del Root Mean Square (RMS).

Nel modello in esame l'andamento del RMS normalizzato (User's Manual for Visual Modflow) mostra una curva discendente abbastanza netta nel periodo iniziale di assestamento, dopodiché presenta un andamento altalenante, con massimi su valori di circa 20% e minimi di poco inferiori a 15%.

Vari tentativi di variazione dei valori dei parametri di input più soggetti ad incertezza sono stati effettuati, verificando sistematicamente la distribuzione areale dei punti di maggior discrepanza tra dati rilevati e risultati calcolati. Lo strumento di affinamento più efficace si è dimostrato l'estensione della funzione Drain, dai principali fossi e canali di bonifica idraulicamente collegati al Fosso Lamone, anche a numerosi elementi della rete scolante minore.

In prossimità degli insediamenti antropici e soprattutto in corrispondenza dell'abitato di San Piero a Grado (porzione del modello più lontana

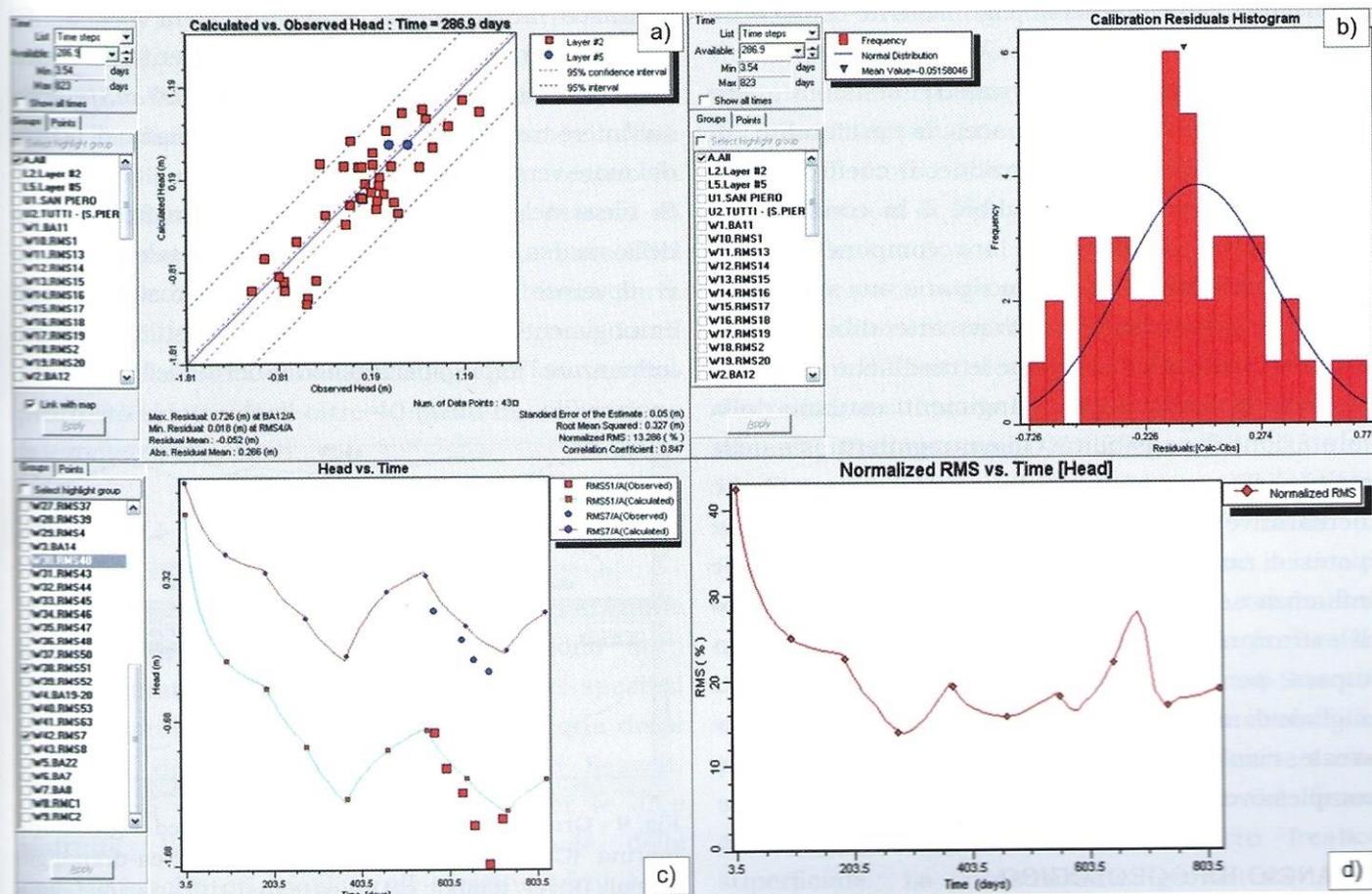


Fig. 8 - Grafici di calibrazione per il modello di area vasta: a) Grafico calcolato/osservato a 287 giorni dall'inizio della simulazione; b) Istogramma residuale; c) Head vs. time plot, i punti rappresentano i valori osservati; d) RMS/tempo per l'intera simulazione.

Fig. 8 - Calibration plots for the wide area model: a) Calibrated vs. observed plot at 287 days; b) Residual histogram; c) Head vs. time plot, points represents observed values; d) RMS vs. time.

dalla costa in figura 7, si è notata una residua marcata discrepanza tra i valori calcolati dal modello e quelli osservati nella realtà con i primi sistematicamente più alti dei secondi. In questi casi si è deciso di inserire arbitrariamente ulteriori emungimenti e di modulare l'entità sia di questi nuovi che di quelli già implementati, in modo da minimizzare la discrepanza. Tale operazione trova giustificazione nell'elevata diffusione, riscontrata durante i rilievi di campagna e nella pratica comune, di dichiarazioni delle quantità dichiarate emunte dai pozzi sistematicamente ed ampiamente approssimate per difetto.

La fase di calibrazione ha permesso di identificare quei parametri che anche per piccole variazioni influenzano in maniera rilevante i risultati della calibrazione del modello. Si tratta dei "parametri sensibili", specifici per ciascun modello, che influiscono in maniera significativa sull'entità dell'errore (User's Manual for Visual Modflow).

In questo modello i parametri sensibili sono risultati l'infiltrazione efficace, la profondità di estinzione dell'evapotraspirazione, il coefficiente di immagazzinamento delle sabbie e la conduttanza dei dreni. Al contrario, le tre componenti della conducibilità idraulica non mostrano una sensibilità così elevata come sarebbe invece attendibile.

E' necessario sottolineare che le modifiche relative a numero ed entità degli emungimenti esulano dalla valutazione di sensibilità. Gli emungimenti, sia nelle entità dichiarate (ricavate da pratiche burocratiche dichiarative, autorizzative e concessorie), che nelle ipotesi di nuovo inserimento non mostrano una reale influenza se non nell'immediato intorno del punto di estrazione. In effetti, la loro entità globale non supera, per l'intera area, l'ordine di grandezza del migliaio di m³/giorno e, vista la loro frammentazione areale, risultano pressoché ininfluenti sul bilancio complessivo.

BILANCIO IDROGEOLOGICO

Il software Visual Modflow 4.2® permette di determinare il bilancio idrogeologico del flusso all'interno del dominio del modello e di identificare le entrate e le uscite del sistema acquifero in

questione. Si deve tener presente che i dati forniti da questa funzione sono affetti dallo stesso errore residuale della calibrazione (User's Manual for Visual Modflow).

Dai risultati del bilancio idrogeologico dell'area vasta (Fig. 9), si ricava come i corpi idrici superficiali principali dell'area contribuiscano in maniera marginale al bilancio idrico sotterraneo, con forte prevalenza dell'ablazione (mediante circa 300 m³/giorno) su quello di apporto (circa 10 m³/giorno), mentre la voce più importante tra i fattori di ablazione idrica, insieme all'evapotraspirazione, risultano le attività di bonifica (Drain) con valori medi giornalieri compresi tra i 10.000 ed i 20.000 m³/giorno.

Il deflusso sotterraneo a mare è significativo, ma non enorme (la bonifica drena dall'acquifero freatico circa un ordine di grandezza in più di quanto non defluisca naturalmente a mare per via ipogea). E' presente, anche se di entità relativamente modesta (supera raramente e per breve tempo i 200 m³/giorno sull'intero tratto di costa indagato) un richiamo di acqua dal mare verso l'acquifero costiero.

Si rileva nel periodo modellato un sovrasfruttamento della risorsa appena percettibile, ma a tale proposito è doveroso ricordare la palese sottostima degli emungimenti. Tale sottostima non risulta peraltro influenzare l'impiegabilità generale del modello calibrato.

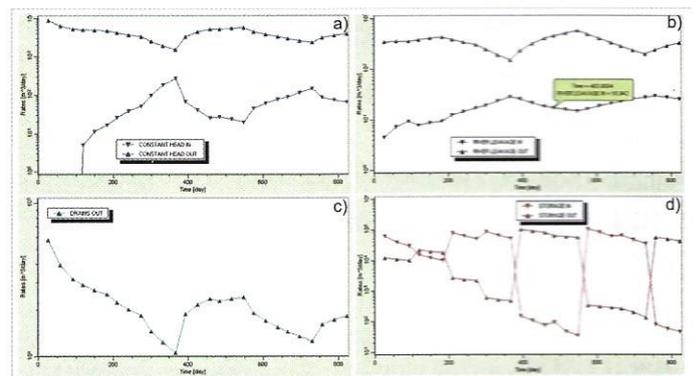


Fig. 9 - Grafici di bilancio: a) Uscite a mare ed ingressione marina (Constant Head/tempo); b) Ricarica-drenaggio fluviale (River/tempo); c) Drain/tempo; d) Variazione della risorsa (Storage/tempo).

Fig. 9 - Water budget plots: a) Seaward groundwater outflow and Seawater intrusion (Constant head/time); b) Recharge-river drain (River/time); c) Drain/time; d) Available groundwater resources changes (Storage/time).



VALUTAZIONE DEI RISULTATI DEL MODELLO DI AREA VASTA

Il modello di area vasta della fascia costiera della piana di Pisa tra Arno e Scolmatore è risultato molto più complesso da calibrare di quanto l'apparente semplicità del contesto idrogeologico avrebbe lasciato supporre. Hanno pesato in modo particolare la totale assenza di dati per una vasta porzione dell'area modellata (Camp Darby) e la scarsa e non troppo attendibile informazione circa l'entità degli emungimenti. In effetti, il grado di affidabilità raggiunto da tale modello di area vasta, fornito dal valore di RMS (Root Mean Square), avente valori massimi di circa 20% e minimi di poco inferiori a 15%, non è ottimale (per una buona attendibilità del modello calibrato i valori di RMS dovrebbero attestarsi su valori inferiori al 10%).

Il coefficiente di correlazione medio calcolato dal software Visual Mod Flow è risultato 0,79, valore comunque accettabile se si considera il modello di area vasta come propedeutico per la definizione delle condizioni al contorno nell'implementazione dei modelli di dettaglio per l'acquifero freatico in corrispondenza delle aree ristrette di Marina di Pisa e Tirrenia. Il valore relativamente basso del coefficiente di correlazione è infatti in buona parte derivato dalla possibilità di limare discrepanze locali tra valori calcolati ed osservati solo per un numero piuttosto ridotto degli oltre 40 punti di calibrazione (piezometri) impiegati.

I MODELLI DI "AREA RISTRETTA" DI MARINA DI PISA E TIRRENIA

Per le aree di maggior incidenza di concentrazione edilizia, Marina di Pisa e Tirrenia sono stati implementati e calibrati modelli numerici specifici per la simulazione dell'interazione tra acqua dolce e acqua di mare mediante il modulo Seawat. Individuati i domini di modellazione per le aree ristrette, l'arrangiamento tridimensionale delle caratteristiche principali e gli stress esterni sono stati estratti dal modello di area vasta. La risoluzione planimetrica è stata incrementata mediante infittimento della griglia originale.

Per la specifica calibrazione del modulo Seawat,

ciascun punto di monitoraggio è stato dettagliato con i dati di salinità a quattro differenti quote ricavate sia dalle campagne di misura conducimetrica effettuate dal Comune di Pisa (gennaio 2008-dicembre 2009), sia da analisi chimiche di laboratorio rese disponibili dall'IGG-CNR di Pisa.

I domini di modellazione per le aree ristrette sono stati tracciati su Cartografia Tecnica Digitale della Regione Toscana 1:10.000 ed importati come mappe di background in Visual Modflow.

Per Marina di Pisa (Fig. 10) i limiti imposti del dominio hanno le seguenti dimensioni: X max: 3593 m, Y max: 3505 m, Z max: 4 m, Z min: -50 m. Per l'area di Tirrenia (Fig. 11) le dimensioni sono: X max: 3721 m, Y max: 4107 m, Z max: 4 m, Z min: -50 m. All'interno del dominio di modellazione di Marina di Pisa è stata inserita anche la foce del Fiume Arno, in quanto elemento significativo in relazione all'apporto diretto di acqua salata verso l'entroterra. Come per il modello di area vasta, l'altimetria digitale delle terre emerse è stata ricavata dai dati del rilievo laser scanner, mentre per il fondo marino si è fatto ricorso alle sezioni batigrafiche rilevate dalla Provincia di Pisa ed integrate con i dati della cartografia nautica di dettaglio. Le celle inattive sono state poste sugli ultimi strati, ininfluenti per la modellazione dell'acquifero superficiale.

Per Marina di Pisa il dominio di modellazione è stato discretizzato sul piano X-Y in 60 righe e 60 colonne, con celle di dimensioni DX = 59 m e DY = 58,4 m. Per Tirrenia, sul piano X-Y in 60 righe e 60 colonne, con celle di dimensioni DX = 62 m e DY = 68 m.

Per quanto concerne la discretizzazione verticale, essa rispecchia, per le due aree ristrette, totalmente quella di area vasta; dalla superficie alla profondità di -50 m dal p.d.c., sono stati implementati 9 strati, di cui solo i primi 6 attivi. Come già accennato in precedenza, infatti, il lavoro di modellazione svolto si è concentrato solo su uno studio del flusso e della relativa salinità nell'acquifero freatico superficiale. La ricostruzione geometrica degli acquiferi confinati sottostanti, in corrispondenza dei quali la scarsità dei dati disponibili non ha consentito una più precisa ricostruzione del modello concettuale, è stata effettuata attraverso

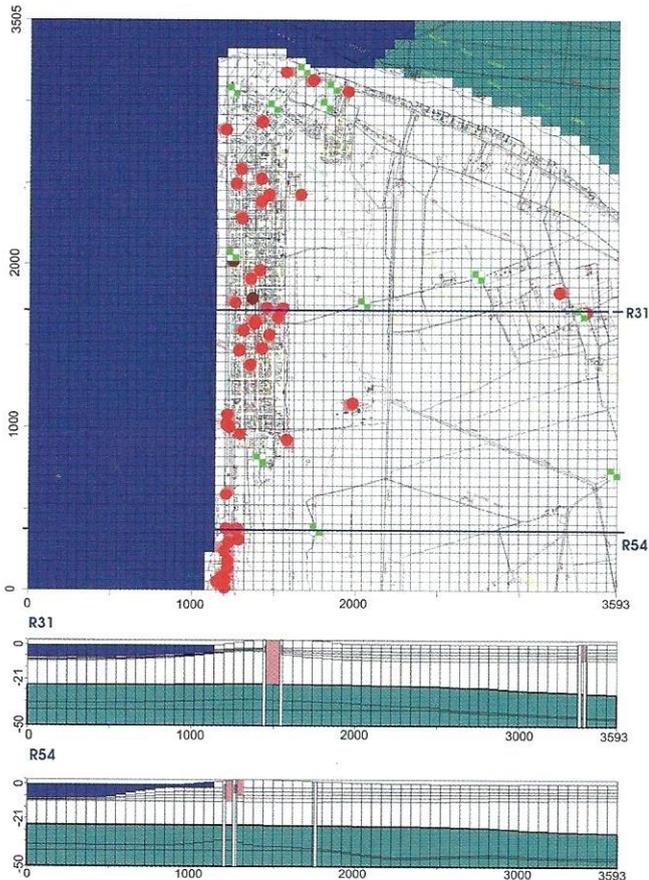


Fig. 10 - Dominio di modellazione area ristretta di Marina di Pisa. Sono riportati: griglia, pozzi di osservazione (verde), pozzi di emungimento (rosso). In blu l'area a concentrazione salina costante (mare).

Fig. 10 - Modelling domain of Marina di Pisa. The grid, observation wells (green) and pumping well are shown. The area with constant salinity (sea) is in blue.

una correlazione esclusivamente granulometrica al fine di poter introdurre in fase di modellazione un dominio bel più vasto in previsione di una futura ottimizzazione del dettaglio stratigrafico profondo nell'area di studio; tale porzione, in questo lavoro, non è stata comunque oggetto né di calibrazione né di simulazione ma è stata comunque implementata al fine di poter preparare il modello ad una sua ottimizzazione futura.

La discretizzazione temporale è stata adottata come nel modello di area vasta con 9 Stress Periods.

Ad ogni cella attiva di entrambi i modelli è stato inizialmente assegnato il set di proprietà idrauliche ottimizzate nella calibrazione di area vasta e successivamente aggiornate con specifica calibrazione (Tab. 2).

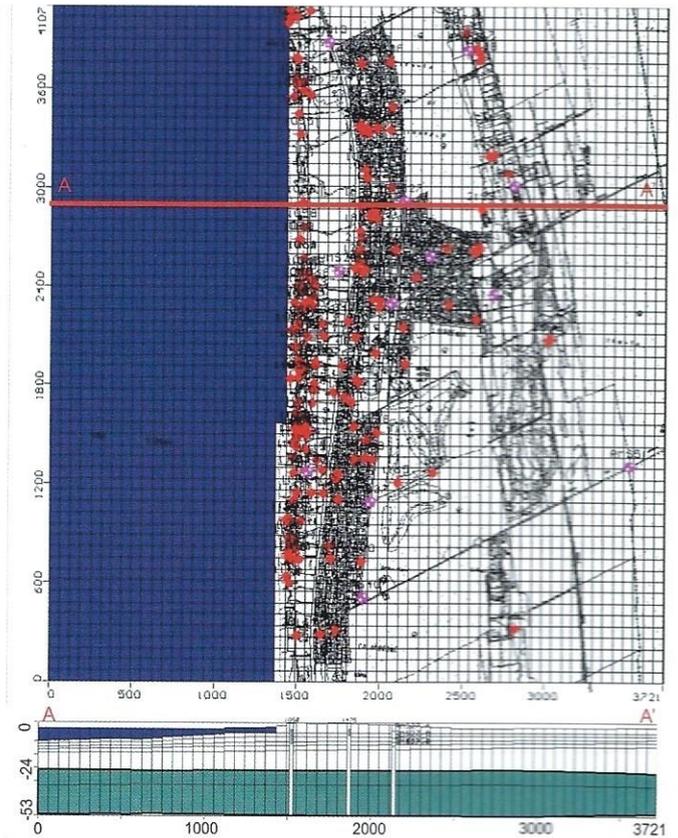


Fig. 11 - Dominio di modellazione area ristretta di Tirrenia. Sono riportati: griglia, pozzi di osservazione (blu), pozzi di emungimento (rosso). In blu l'area a concentrazione salina costante (mare).

Fig. 11 - Modelling domain of Tirrenia. The grid, observation wells (green) and pumping well are shown. The area with constant salinity (sea) is in blue.

Le condizioni al contorno, mare, fiume e canali di bonifica sono state mutate dal modello di area vasta e modellate rispettivamente con le funzioni Constant Head, River e Drain.

Per quanto concerne la salinità, il mare è stato considerato un corpo idrico con salinità costante (Constant Concentration, CC) pari a 39.071 mg/l per tutto il periodo di modellazione (pari a 823 giorni) (User's Manual for Visual Modflow). La stessa salinità del mare è stata assegnata al primo km di foce del Fiume Arno. Questo sulla base dei log conducimetrici (dati forniti dall'IGG-CNR), che mostrano l'ultimo tratto del Fiume Arno essere pressoché totalmente caratterizzato da conducibilità elettriche pari a quelle del mare. Come condizioni iniziali di salinità, sono state implementati quelle effettivamente misurate nella prima campagna di misura.



Litotipo	Kx (m/s)	Kv (m/s)	Kz (m/s)	Ss	Sv	n (%)	n _e (%)
Mare	100	100	100	0.99	0.99	0.99	0.99
Sabbie dunali	0.01	0.01	0.01	1·10 ⁻⁴	0.3	0.3	0.3
Arella	1.63·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁷	9.9·10 ⁻⁹	1·10 ⁻³	0.2	0.2	1·10 ⁻⁵

Tab. 2 - Valori di permeabilità, specific storage, specific yield, porosità totale ed efficace inseriti nei modelli di area ristretta per ogni litotipo.

Tab. 2 - Values of the hydraulic conductivity, specific storage, specific yield, total and effective porosity attributed to each lithotype of the local area.

Ricarica, evapotraspirazione ed emungimenti sono stati in prima battuta implementati come quelli di area vasta; gli emungimenti sono stati quindi modificati in fase di calibrazione.

La distribuzione dei pozzi di osservazione per Marina di Pisa è mostrata in figura 10, mentre per Tirrenia sono riportati in figura 11.

RUN E CALIBRAZIONE DEI MODELLI

Anche per la riproduzione simulata (Run) dei modelli di area ristretta è stato utilizzato il metodo iterativo SIP.

La calibrazione dei modelli Marina di Pisa e Tirrenia ha comportato un modesto riarrangiamento delle proprietà idrauliche, ma sensibili modifiche per gli emungimenti; non solo è stato necessario incrementare gli emungimenti dei pozzi ufficialmente registrati (i cui dati erano risultati palesemente sottostimati nel modello di area vasta), ma nelle aree in cui le concentrazioni calcolate si mantenevano costantemente inferiori a quelle osservate, si è deciso di aggiungere nuovi pozzi "fittizi" per emungimenti colulati ottenuti per tentativo ed errore fino alla minimizzazione delle differenze calcolati/osservato. Gli emungimenti che hanno consentito la calibrazione risultano, in genere, di almeno un ordine di grandezza superiori a quelli ricavabili dalla documentazione ufficiale sia per i pozzi per uso domestico che per quelli soggetti a concessione. I grafici relativi all'analisi di calibrazione dei valori di concentrazione salina sono mostrati in figura 12 A e B per Marina di Pisa ed in figura 13 A e B per Tirrenia.

Per Marina di Pisa il diagramma dei residui di calibrazione (Fig. 12 B) mostra la distribuzione delle differenze tra valori calcolati ed osservati: i valori si concentrano attorno allo zero, ma permangono dei

gruppi di punti sia in sottostima che in sovrastima della salinità. Nel diagramma di figura 12 A, la situazione mostrata si mantiene sostanzialmente invariata per l'intero andamento della calibrazione, con valori della media normalizzata della radice dei quadrati delle differenze calcolato-osservato (RMS), che si mantengono tra 10% e 20% per l'intero periodo modellato. In termini di concentrazione, ciò equivale ad un risultato per oltre il 90% affidabile entro un margine residuo d'incertezza di poco inferiore a 1 g/l di salinità, con picchi massimi locali comunque non superiori ai 6 g/l per le zone a concentrazione più elevata.

In sintesi, la calibrazione mostra un modello numerico di distribuzione ed evoluzione della salinità nell'area di Marina di Pisa sostanzialmente aderente alla realtà, ma con locali discrepanze che non è stato possibile eliminare principalmente per l'incertezza residua relativa ad entità e distribuzione degli emungimenti e, soprattutto, all'effettiva distribuzione e quota attiva della rete scolante minore (che nell'area urbanizzata prosegue con la rete di fognatura bianca), collegata idraulicamente al collettore di ablazione idrica principale (Fosso Lamone).

Per Tirrenia invece l'andamento del diagramma valori calcolati/valori osservati (Fig. 13 A) rivela un netto addensamento di dati attorno a concentrazioni saline generalmente basse. I valori della media normalizzata della radice dei quadrati delle differenze calcolato-osservato (RMS) si mantengono tra 10% e 15% per l'intero periodo modellato (Fig. 13 B).

Come per l'area di Marina di Pisa, anche per quella di Tirrenia la calibrazione del modello di ingressione marina testimonia una ragionevole rispondenza del comportamento del modello con la realtà fisica. E doveroso sottolineare comunque che, per questa zona, la totale assenza di dati per una porzione di area vasta piuttosto estesa, immediatamente ad est della zona di modellazione ristretta, costituisce una fonte di incertezza non eliminabile. I rari dati di concentrazioni saline ivi effettivamente misurati indicano infatti la presenza di acque decisamente salate al confine est del dominio di modellazione;

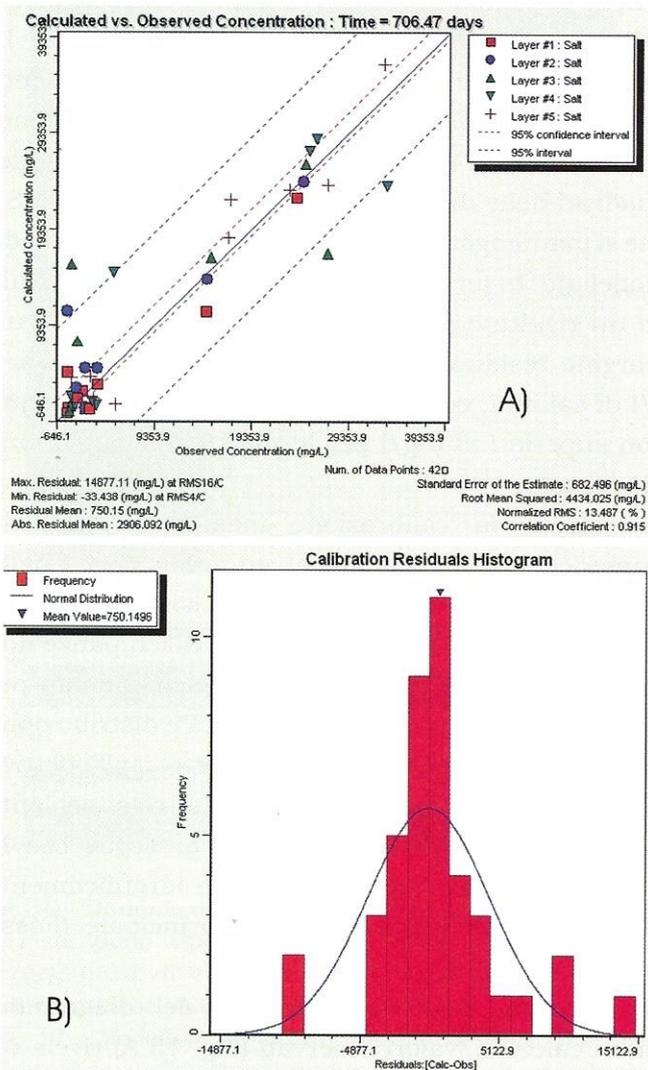


Fig. 12 - Diagrammi di calibrazione dei valori di concentrazione salina per l'area di Marina di Pisa: A) Calcolato vs. osservato (T = 706 gg); B) Residui di calibrazione.

Fig. 12 - Marina di Pisa salinity calibration plots: A) Calculated vs. observed (T = 706 days); B) Calibration residuals histogram.

l'osservazione dell'idrografia di area vasta suggerirebbe un'attenta valutazione del ruolo del Canale dei Navicelli quale vettore diretto di acque salate marine nell'entroterra. La quantificazione e simulazione modellistica di tale ruolo sarà possibile solo a valle del rilevamento di serie temporali significative di salinità dell'acquifero superficiale in prossimità del canale ed a varie distanze da esso.

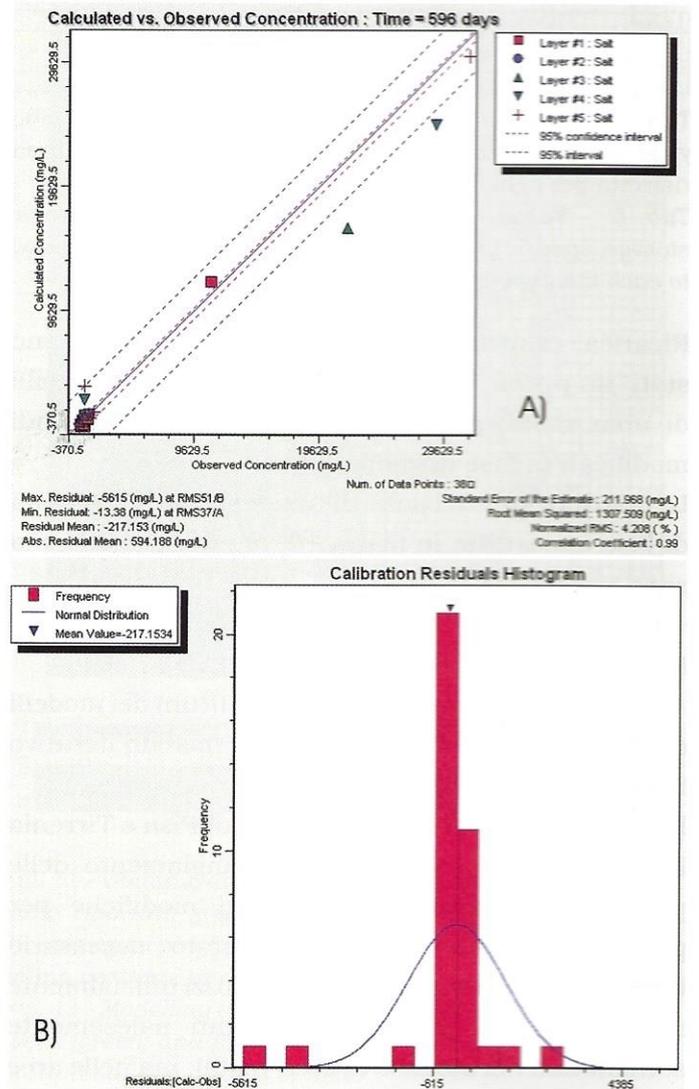


Fig. 13 - Diagrammi di calibrazione dei valori di concentrazione salina per l'area di Tirrenia: A) Calcolato/osservato (T = 596 giorni); B) Residui di calibrazione.

Fig. 13 - Tirrenia salinity calibration plots: A) Calculated vs. observed (T = 596 days); B) Calibration residuals histogram.

BILANCIO E RISULTATI PER IL MODELLO MARINA DI PISA

In figura 14 sono visibili i grafici della distribuzione, cumulativa (total IN e total OUT) e distinta per tipologia, degli apporti alla falda e delle ablazioni dalla falda, ed il bilancio della falda stessa per l'area ristretta di Marina di Pisa.

Per quanto riguarda gli apporti, la voce principale è rappresentata dall'infiltrazione diretta (Recharge In) con ordine di grandezza attorno ai 104 m³/giorno; circa un ordine di grandezza inferiore è l'apporto di



acque dal mare (Constant Head In) ed ancora un ordine di grandezza al di sotto, con circa 102 m³/giorno, l'apporto dal fiume (River Leakage In). E' opportuno notare che il fiume, nel tratto considerato, presenta una salinità pressoché indistinguibile da quella del mare, fatta eccezione per i momenti di piena, che non è praticamente possibile inserire efficacemente alla scala dei tempi di modellazione impiegati.

Le ablazioni dalla falda vedono prevalere significativamente, con valori costantemente attorno a 104 m³/giorno, gli effetti della bonifica meccanica (Drain Out) seguiti, con una differenza di circa un ordine di grandezza, da evapotraspirazione (ET Out) ed emungimenti (Wells Out); infine, con valori attorno ai 102 m³/giorno, segue il deflusso verso il mare (Constant Head Out).

L'andamento sostanzialmente bilanciato della quantità d'acqua presente nella falda freatica (Storage In ed Out) rispecchia una situazione in cui le ablazioni sono compensate dagli apporti. Dal punto di vista della salinità, è doveroso sottolineare come tali apporti avvengano in quantità minoritaria, ma non trascurabile, per richiamo di acque da corpi idrici superficiali confinanti con salinità appena inferiore ai 40 g/l, il mare e la foce dell'Arno.

In figura 13 si può osservare l'output modellistico relativo al termine della simulazione di calibrazione. Si è scelto di impiegare una scala cromatica ad andamento logaritmico per evidenziare meglio le aree francamente "dolci", la fascia di transizione ed i corpi idrici salati.

La figura 15a mostra l'andamento in pianta della salinità nello strato 3, ben rappresentativo della falda freatica. Si nota una prima zona dolce nell'immediata prossimità della sponda sinistra della foce fluviale del Fiume Arno; tale zona corrisponde all'attuale cantiere per la realizzazione del porto di Marina di Pisa, che per l'intero periodo della calibrazione si è di fatto comportata come un piccolo bacino endoreico, con ottima ricarica locale dovuta alle elevate precipitazioni meteoriche che hanno caratterizzato il periodo modellato. Immediatamente a sud, nell'abitato di Marina di Pisa, la falda freatica appare marcatamente salata, con valori fino a

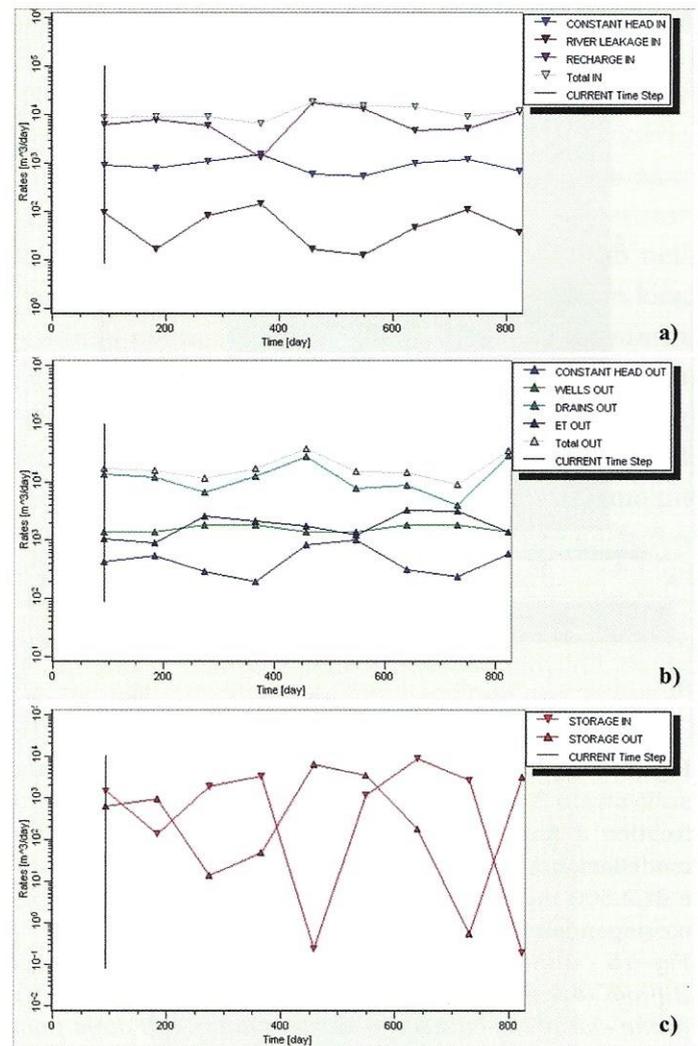


Fig. 14 - Grafici di bilancio per l'area di Marina di Pisa: a) Principali voci di entrata (m³/g) nel tempo; b) Principali voci di uscita (m³/g) nel tempo; c) Uscite ed entrate (m³/g) nel tempo per lo Storage.

Fig. 14 - Water budget diagrams for the Marina di Pisa area: a) Main in fluxes (m³/g) vs. time; b) Main out fluxes (m³/g) vs. time; c) Storage in and out (m³/g) vs. time.

13.000 mg/l, mentre ancora più a sud si può notare una situazione di salinità molto ridotta (fino a 800 mg/l), limitatamente alla fascia dei cordoni dunali costieri, caratterizzati da elevata infiltrazione della ricarica meteorica. Si possono inoltre osservare dei "cordoni salati" in corrispondenza dei canali e fossi di bonifica (11.000 mg/l).

Osservando la sezione di figura 15b, si nota come le aree "dolci" di falda corrispondano a porzioni di acquifero superficiale dove un corpo idrico a bassa salinità sovrasta livelli sistematicamente più salati. Tale orizzonte non salato corrisponde esattamente

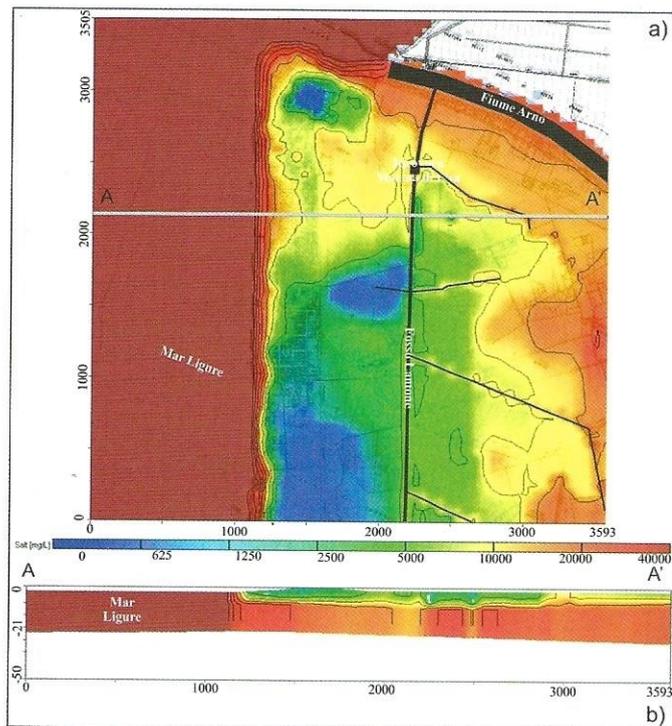


Fig. 15 - a) Distribuzione della salinità (mg/l) simulata sullo strato 3 (da -4,0 m a -8,0 m s.l.m.m.) nell'acquifero freatico a fine calibrazione (dopo 823 giorni da inizio modellazione) nella zona di Marina di Pisa. L'equidistanza è di 2.500 mg/l; b) Distribuzione della salinità (mg/l) in corrispondenza della sezione A-A'.

Fig. 15 - a) Simulated salinity (mg/l) distribution at level 3 (from -4.0 m to -8.0 m a.s.l.) in the unconfined aquifer at the end of the calibration process (after 823 days from the start of modelling) in the Marina di Pisa area. The difference between two adjoining lines is 2,500 mg/l; b) Salinity (mg/l) distribution along the A-A' section.

alla parte di territorio con quote topografiche più elevate e maggiore infiltrazione meteorica. Si possono inoltre notare i richiami di acque salate sottostanti sia in corrispondenza di emungimenti che, in maniera molto più marcata, degli assi di drenaggio di bonifica (Fosso Lamone), dove l'artificiale mantenimento di un livello freatico sistematicamente inferiore al livello del mare produce un richiamo di acque più profonde, salate, visibili figura 15b come strisciate e spot con tinte calde rappresentanti appunto maggior concentrazione salina.

In sintesi la modellazione riproduce efficacemente la situazione reale, con un orizzonte idrico dolce, alimentato pressoché esclusivamente da infiltrazione diretta, che satura le porzioni più superficiali dei cordoni dunali, "galleggiando" su acque ad elevata

salinità, che si estendono fino quasi ad affiorare nelle aree retrodunali della piana.

BILANCIO E RISULTATI PER IL MODELLO TIRRENIA

In figura 16 sono visibili i grafici della distribuzione cumulativa (Total In e Total Out), distinta per tipologia, degli apporti alla falda e delle ablazioni dalla falda ed il bilancio della falda stessa (Storage In ed Out) relativamente all'area di Tirrenia. Per quanto riguarda gli apporti (Fig. 16a), come per Marina di Pisa, anche per Tirrenia la voce principale è rappresentata dall'infiltrazione diretta (Recharge In), con ordine di grandezza attorno ai 104 m³/giorno; circa venti volte inferiore è l'apporto di acque dal mare (Constant Head In). E' opportuno notare che il modello di flusso di area ristretta mostra inequivocabilmente un marcato richiamo anche da est (entroterra), da una zona cioè che presenta salinità dell'acquifero freatico molto elevata e spesso prossima a quella del mare. In assenza di sufficienti dati, si è comunque preferito non implementare un'ulteriore area di Constant Concentration (CC) ad est del modello, i cui valori sarebbero risultati necessariamente arbitrari.

Le ablazioni dalla falda (Fig. 16b) vedono prevalere, con valori dai 2.000 ai 6.000 m³/giorno, gli effetti della bonifica meccanica (Drain Out), mentre l'evapotraspirazione sottrae da 2.000 ai 6.000 m³/giorno, con andamento sommariamente speculare rispetto alla bonifica; gli emungimenti cumulati (come ricalcolati in fase di calibrazione) si mantengono attorno al migliaio di m³/giorno. Infine, con valori dai 200 ai 100 m³/giorno, segue il deflusso verso il mare: tale valore, comparabile con quello del richiamo di acque dal mare, è qualitativamente confermato dal ridottissimo effetto di salinizzazione diretta dalla direzione della costa, che si discuterà in seguito.

L'andamento sostanzialmente bilanciato della quantità d'acqua presente nella falda superficiale (Storage In e Storage Out) rispecchia una situazione in cui le ablazioni sono compensate dagli apporti (Fig. 16c).

Dal punto di vista della salinità, tuttavia, non si può non evidenziare un continuo e netto richiamo

di acque sia dall'entroterra (ad est) che dal lato meridionale del dominio di modellazione; entrambe tali aree risultano sede di falda superficiale ad elevata salinità, per cui a tale pareggio di bilancio di flusso idrico corrisponde un costante incremento della salinità della falda freatica dell'area. In figura 17a è visibile la mappa di salinità dello strato 3, ben rappresentativo dell'acquifero superficiale, al termine della simulazione di calibrazione (823 giorni). Il richiamo, sia prodotto da emungimenti

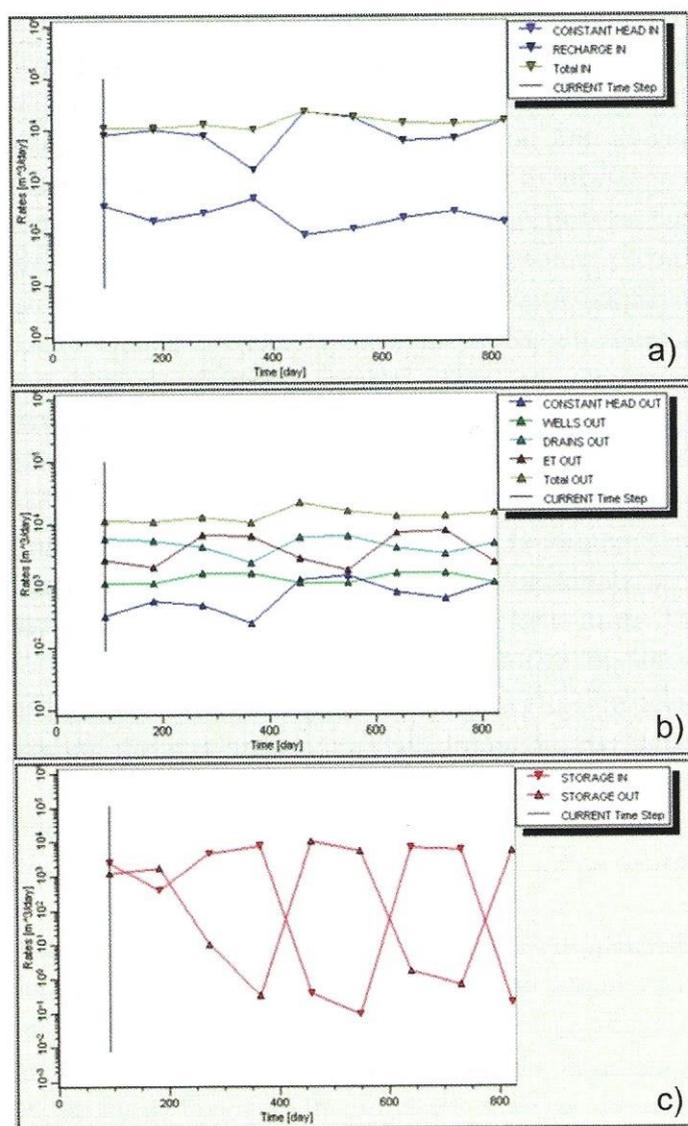


Fig. 16 - Grafici di bilancio per l'area di Tirrenia: a) Grafico delle principali voci di entrata (m³/g) nel tempo; b) Grafico delle principali voci di uscita (m³/g) nel tempo; c) Grafico di uscite ed entrate (m³/g) nel tempo per lo Storage.

Fig. 16 - Water budget diagrams for the Tirrenia area: a) Main in fluxes (m³/g) vs. time; b) Main out fluxes (m³/g) vs. time; c) Storage in and out (m³/g) vs. time.

che da bonifica meccanica, è palese. La sezione (Fig. 17b) evidenzia ancor meglio il fenomeno.

Nel caso di Tirrenia, a differenza di quanto si osserva a Marina di Pisa, il corpo idrico dolce, a ricarica meteorica diretta, appare, almeno nella porzione settentrionale del dominio di modellazione, saturare completamente l'acquifero superficiale, e solo nella zona meridionale, in evidente correlazione con locali emungimenti, si osserva un'ingressione marina propriamente detta. In entrambe le sezioni (Marina di Pisa e Tirrenia) sono particolarmente evidenti gli effetti del richiamo di acque salate ad opera della bonifica esercitata dal fosso Lamone (Drain), ma tale richiamo, come già accennato, si esercita da sud ed est, piuttosto che direttamente dal mare.

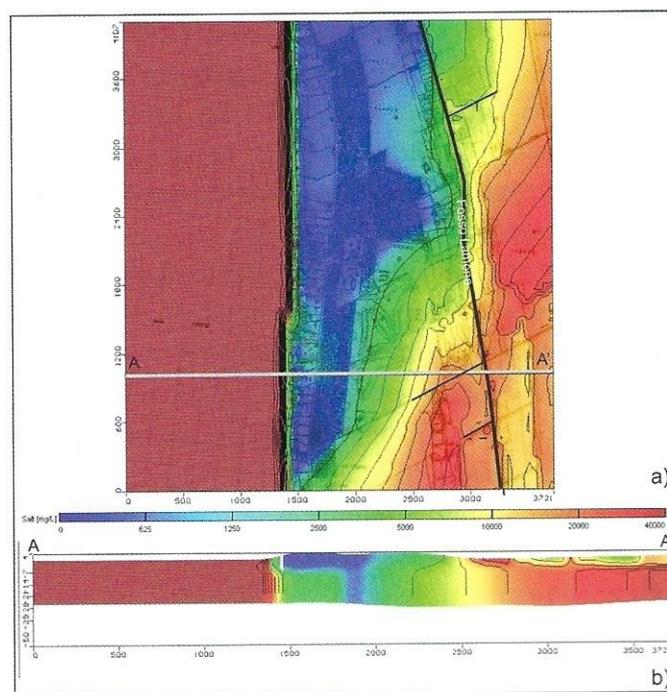


Fig. 17 - a) Distribuzione delle salinità simulate (mg/l) sullo strato 3 (da -3.5 a 6.5 m s.l.m.m) nell'acquifero freatico a fine calibrazione (dopo 823 giorni da inizio modellazione) in the Tirrenia area. L'equidistanza è di 2.500 mg/l, b) Distribuzione della salinità (mg/l) in corrispondenza della sezione A-A'.

Fig. 17 - a) Simulated salinity (mg/l) distribution at level 3 (from -3.5 m to -6.5 m a.s.l.) in the unconfined aquifer at the end of the calibration process (after 823 days from the start of modelling) in the Tirrenia area. The difference between two adjoining lines is 2,500 mg/l. b) Salinity (mg/l) distribution along the A-A' section.



CONCLUSIONI GENERALI

I modelli, al termine della calibrazione, hanno raggiunto un accettabile grado di aderenza alle condizioni idrogeologiche reali dell'area, per quanto concerne la comprensione del fenomeno dell'intrusione marina nel locale acquifero freatico. E' importante notare che per raggiungere tale risultato è stato necessario incrementare l'entità relativa agli emungimenti di circa un ordine di grandezza rispetto ai dati ufficiali forniti dagli enti preposti al rilascio delle concessioni. Tale decisione è stata presa considerato che la variazione degli altri parametri sensibili, oltre a quello "emungimenti", non consentivano un apprezzabile miglioramento dell'RMS: ricarica ed evapotraspirazione, infatti, agiscono essenzialmente con variazioni a scala areale vasta, mentre i drenaggi hanno un prevalente effetto locale, e nessuna delle combinazioni ragionevoli di drenaggio, evapotraspirazione e ricarica erano in grado di spiegare dei bassi piezometrici corrispondenti ad aree antropizzate o centri rurali rilevanti in corrispondenza dei quali è ragionevole ipotizzare una causa da emungimento dell'abbassamento locale di falda.

Nel complesso, la situazione dell'acquifero freatico della porzione costiera della pianura pisana vede un modesto grado di ingressione marina diretta sulla linea di costa; si incontra quindi, in corrispondenza della fascia dei cordoni dunali, un corpo idrico dolce che sovrasta, nella zona di Marina di Pisa una lamina basale salata, mentre a Tirrenia, soprattutto nella zona nord, satura completamente l'acquifero freatico fino all'acquicludite di base. Verso l'entroterra, rispetto ai cordoni dunali (area corrispondente ad antiche lagune retrodunali), la falda mostra salinità da elevate ad elevatissime.

L'analisi di sensibilità per i modelli sopra descritti (sia per l'area vasta, che per le aree ristrette di Marina di Pisa e Tirrenia) mostra che i parametri che maggiormente influenzano il modello sono entità del drenaggio, ricarica, evapotraspirazione ed emungimenti.

Potrebbe essere quindi utile far variare questi parametri al fine di osservare, attraverso simulazioni previsionali sulle aree ristrette, gli effetti a lungo

termine dell'alterazione nel tempo di questi. I due modelli così calibrati si prestano, infatti, ad operazioni di riproduzione simulata previsionale con un grado di attinenza alla realtà più che buono, come mostrato dai grafici di calibrazione.

Purtroppo l'assenza di una quantificazione temporalmente estesa e della salinità delle acque allontanate dai drenaggi, neppure nel punto di confluenza agli impianti di sollevamento meccanico non ha consentito una chiara identificazione di quale porzione delle acque allontanate dai drenaggi sia di origine subaerea o di corpi idrici sotterranei dolci, e quelli di origine più profonda, salata.

In sintesi, i modelli implementati e calibrati per la prossimità della costa della pianura pisana hanno consentito di un approccio alla normazione dell'uso del territorio e della risorsa idrica sotterranea basato su una conoscenza della situazione reale, liberandosi quindi del vasto margine di incertezza derivante da analisi deterministiche con valore esclusivamente puntuale. E' stato anche possibile individuare gli effetti collaterali indesiderati della tecnica di ablazione a mezzo di sollevamento artificiale delle acque meteoriche con una rete colante-drenante nettamente al di sotto del livello del mare ed in sua prossimità, in assenza di barriere idrauliche efficaci. E' stato inoltre possibile individuare, ancorché solo quantitativamente, e con ampi margini di incertezza, la fondamentale e sistematica sottostima degli emungimenti dichiarati individuando le aree dove la reale concentrazione dell'attività di pozzi ha maggiori effetti sull'avanzamento-risalita del cuneo salino.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito di un progetto più ampio sullo studio dell'intrusione marina promosso dall'Amministrazione Comunale di Pisa. Si ringrazia il Comune di Pisa, ed in particolare il Dott. Geol. Marco Redini ed il suo ufficio, per il sostegno economico e per la disponibilità di mezzi ed attrezzature.



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AMBROSIO M., BALDACCI F., DEL SORDO A., FAGIOLI M.T., GIANNECCHINI R., PUCCINELLI A., SARTELLI A. (2009) - Crisi da sovrasfruttamento della risorsa idrica sotterranea: modellazione numerica in un'area campione della Piana di Lucca. 3° Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale (AIGA), Riassunti, pag. 11-12.
- BALDACCI F., BELLINI L., RAGGI, G. (1994) - Le risorse idriche sotterranee della della Pianura di Pisa. Atti della Società Toscana di Scienze Naturali Memorie Serie 101 (A), 241-322.
- BALDACCI F. (1999) - Struttura e piezometria del "primo acquifero artesianico in ghiaie" della pianura pisana. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. Mem., 106 (A), 91-101.
- BARAZZUOLI P., BOUZELBOUDJEN M., CUCINI S., KIRALY L., MENICORI P., SALLEOLINI M. (1999) - Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (southern Tuscany, Italy): database design for groundwater management. *Environmental Geology*, 39, 123-143.
- BARROCU G. (2003) - Seawater intrusion in the coastal aquifers of Italy. In: Calaferra, J. (ed) *State of Seawater intrusion in coastal aquifers of the Mediterranean Coast*. SWIM-SWICA, Alicante, Spain.
- BEAR, J. (1972) - *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier Pub. Co., New York.
- BEAR, J. AND A, VERRUIJT (1987) - *Modeling groundwater flow and pollution*, D. Reidel Publishing, Dordrecht, Holland.
- BUTTERI M., DOVERI M., GIANNECCHINI R., GATTAI P. (2010) - Hydrogeologic-hydrogeochemical multidisciplinary study of the gravel confined aquifer in the coastal Pisan Plain (Tuscany) between the Arno River and Scolmatore Canal (Tuscany). *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, Vol. 90, 51-66.
- CUSTODIO E., LLAMAS M.R. (1996) - *Hidrologia Subterraneea* voll. I-II Segunda edicion. Edicion Omega S.A. Barcelona.
- CUSTODIO E., LLAMAS M.R. (2005) - *Idrologia Sotterranea*, voll. I-II. Flaccovio Editore.
- DELLA ROCCA R., MAZZANTI R., PRANZINI E. (1987) - Studio geomorfologico della pianura di Pisa. *Geog. Fis. Dinam. Quat.*, 10: 56-84.
- DOVERI M., GIANNECCHINI R., GIUSTIG., BUTTERI M. (2009) - Studio idrogeologico-geochemico dell'acquifero freatico nella zona compresa tra il Canale Burlamacca ed il Fosso della Bufalina (Viareggio, Toscana). *EngHydroEnv Geology*, 12, 101-117.
- FREEZE, R. A. AND J. A. CHERRY (1979) - *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- GIMÉNEZ FORCATA E., BENCINI A., PRANZINI G. (2001) - Salinization in coastal plain of Grosseto: Hydrochemical study. In: Cidu, R. (Ed.), *Proc. of the Tenth International Symposium on Water-Rock Interaction*, 1, Balkema, Lisse, 517-520.
- GRASSI S., CORTECCI G., SQUARCI P. (2007) - Groundwater resource degradation in coastal plains: the example of the Cecina area (Tuscany - Central Italy). *Appl. Geochem.*, 22, 2273-2289.
- PRANZINI G. (2002) - Groundwater salinization in Versilia (Italy). *Proc. SWIM 17th, Delft (Olanda)*, 412-421.
- ROSSI S., SPANDRE R. (1994) - L'intrusione marina nella falda artesianica in ghiaia nel litorale pisano. *Acque sotterranee*, 43, 51-58.

THORNTHWAITTE, C. W. (1948) - An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., 38, 55-94.

TRESCOTT P.C., PETER C. (1975) - Documentation of finite difference model of three dimensional ground-water flow - U.S.Geological Survey Open-File Report 75-438.

TRESCOTT P.C., PETER C.F. E LARSON S.P. (1976) - Supplement to Open-File Report 75-438 - Documentation of finite-difference model of three dimensional ground-water flow - U.S.Geological Survey Open-File Report 76-591.

TRESCOTT P.C., PETER C.F. E LARSON S.P. (1976) - Finite difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments - U.S.Geological Survey Techniques of Water-resources Investigations, Book 7, Chapter C1.

USGS BOOK 6 - Modelling Techniques. Waterloo Hydrogeologic Inc. User's Manual for Visual Modflow.

RIATTIVATA LA CONVENZIONE CON EUROPACONCORSI Bandi gratuiti per gli Iscritti

Si informano gli Iscritti che il Consiglio Nazionale dei Geologi ha riattivato la convenzione con Europaconcorsi.

Ricordiamo che per accedere ai servizi offerti occorre possedere i seguenti requisiti

- essere iscritto all'Ordine;
- essere in regola con i pagamenti delle quote annuali di iscrizione.

L'indirizzo WEB per registrarsi è: <http://europaconcorsi.com/logon/geologi>

La convenzione riattivata dal CNG prevede di "ereditare" tutti gli utenti già registrati a seguito di precedenti accordi, ciò al fine di garantire la continuità del servizio senza alcun intervento da parte dell'utente finale.