

Modellazione numerica nell'acquifero costiero compreso tra il Canale Burlamacca ed il Fosso della Bufalina, Versilia Meridionale (Toscana, Italia)

Numerical modelling in the coastal aquifer between Burlamacca Canal and Bufalina Ditch, southern Versilia (Tuscany, Italy)

Gioia Bravini, Matia Menichini, Marco Doveri

Riassunto: I modelli matematici relativi alle acque sotterranee rappresentano uno strumento indispensabile per una gestione ottimale della risorsa idrica e per la sua salvaguardia sia in termini quantitativi che qualitativi. L'area in studio è situata lungo la fascia litoranea della Versilia meridionale (Viareggio, LU), e risulta essere interessata dal fenomeno dell'intrusione marina. Lo scopo principale di questo lavoro è stato quello di realizzare un modello matematico di flusso del sistema acquifero freatico in studio sulla base di un modello concettuale definito mediante un approccio interdisciplinare geologico, idrogeologico e geochimico isotopico. Per la realizzazione del modello numerico di flusso è stato utilizzato il codice di calcolo ModFlow e come interfaccia grafica Visual ModFlow. La costruzione del modello matematico ha previsto una serie di operazioni quali la discretizzazione orizzontale e verticale dello spazio, la definizione delle condizioni iniziali e al contorno, l'attribuzione delle proprietà idrauliche alle celle ed,

infine, la definizione delle perturbazioni esterne al sistema (ricarica, evapotraspirazione, drenaggi e pozzi). Implementazione, sviluppo e calibrazione del modello numerico di flusso sono stati effettuati sia in regime stazionario, sia in regime transitorio. Entrambi i modelli sono stati calibrati con il metodo manuale "trial and error adjustment" sulla base dei livelli misurati durante due campagne piezometriche, rappresentative rispettivamente di una condizione di magra e di morbida dell'acquifero. Inoltre, i risultati del modello in regime transitorio sono stati confrontati con i dati in continuo rilevati dal piezometro della rete di monitoraggio del Servizio Idrologico Regionale presente nell'area in studio. Si osserva una buona correlazione fra i dati misurati e quelli calcolati dal modello che quindi risulta essere sufficientemente rappresentativo e costituisce una solida base di partenza per lo sviluppo di un modello di trasporto utile a controllare e gestire il fenomeno dell'ingressione marina.

Parole chiave: acquiferi costieri, flusso delle acque sotterranee, idrogeochimica, modello concettuale, modellazione numerica.

Keywords: coastal aquifers, groundwater flow, hydrogeochemistry, conceptual model, numerical modeling.

Abstract: Groundwater numerical models are necessary instruments for management of water resources and for their protection, both in terms of quantity and quality. In this paper we present a study on an area located along the southern coastline of Versilia (Viareggio, LU) affected by marine intrusion. The main purpose of this work was to create a mathematical flow model based on a conceptual hydrogeological model defined by a multidisciplinary approach. For the realization of the numerical model the ModFlow code and the graphic interface Visual ModFlow was used. The procedure for defining the mathematical model involves a series of steps such as horizontal and vertical discretization of the space, the definition of the initial and boundary conditions, the assignment of the hydraulic properties of the cells and, finally, the definitions of external perturbations to the system (recharge, evapotranspiration, drainage and pumping wells). Implementation, development and calibration of the numerical flow model was performed both in steady and transient state. Both models were calibrated using the manual "trial and error adjustment" method using heads measurements. Moreover the model results gathered in transient state simulation were compared with the data continuously recorded by a piezometer of the monitoring network of the Regional Hydrological Service. There is a good correlation between the measured data and those calculated by the model which then turns out to be sufficiently representative and provides a solid basis for the development of a transport model that could be useful to control and manage the phenomenon of the salt water intrusion.

Gioia BRAVINI ✉
Università di Pisa, Dip. Scienze della Terra
via Santa Maria 53, Pisa
bravini.g@alice.it

Matia MENICHINI
Marco DOVERI
CNR-IGG, Ist. Geoscienze e Georisorse
via Moruzzi 1, Pisa
m.menichini@igg.cnr.it
m.doveri@igg.cnr.it

Ricevuto: 15 dicembre 2014 / Accettato: 26 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

Introduzione

La gestione delle risorse idriche, inserita anche negli studi di programmazione economica e di pianificazione territoriale, fa oggi largamente utilizzo di modelli matematici. I modelli matematici sono degli strumenti atti a rappresentare un'approssimazione idealizzata (modellazione) di un fenomeno fisico. In particolare i modelli numerici idrodinamici degli acquiferi sono una particolare categoria di modelli matematici in cui il flusso delle acque sotterranee è descritto attraverso le equazioni che governano il fenomeno sia all'interno del sistema sia lungo i suoi confini (condizioni al contorno) mentre la distribuzione dei carichi idraulici è risolta tramite metodi di approssimazione numerica (Anderson & Woessner 1992). Fra le tecniche numeriche di approssimazione, le due più utilizzate nei modelli numerici sono il metodo a differenze finite ed il metodo ad elementi finiti. In entrambi i casi, il sistema naturale è discretizzato mediante un reticolo geometrico formato da celle elementari di forma prismatica o tetraedrica in cui gli elementi fondamentali sono costituiti o dal centro delle celle o dai nodi del reticolo. Tuttavia un modello numerico affidabile deve basarsi su un solido modello idrogeologico concettuale, in quanto, la scelta delle semplificazioni che stanno alla base della sua implementazione dipende strettamente dal modello concettuale costruito. L'affidabilità di un modello, e quindi la qualità delle sue simulazioni, dipende non solo dalla "solidità" del modello idrogeologico concettuale, ma anche dalla qualità e quantità dei dati di input (Franke et al. 1987; Thomas et al. 2004). La disponibilità di dati di campagna omogeneamente distribuiti sul territorio e nel tempo è, infatti, il principale problema in molti studi idrogeologici in quanto spesso le incertezze su alcuni dati, quali ad esempio i parametri idraulici dell'acquifero, misure di livello piezometrico continue nel tempo, altezze idrometriche, portano a dover esemplificare eccessivamente il modello concettuale. Tuttavia, un modello numerico affidabile, se basato su un solido modello concettuale, può essere considerato uno strumento indispensabile per una gestione ottimale della risorsa idrica e per la sua salvaguardia sia in termini quantitativi che qualitativi.

In particolare i modelli relativi alle acque sotterranee possono essere strumenti previsionali per la gestione della risorsa idrica sotterranea soprattutto in quelle aree particolarmente sensibili quali ad esempio molte pianure costiere, caratterizzate spesso non solo da un sovrasfruttamento della risorsa, ma anche dal fenomeno dell'intrusione marina. Tale fenomeno è un problema davvero allarmante se si considera che il 50% della popolazione mondiale vive entro 60 Km dalla linea di riva e che sulle aree costiere, le quali costituiscono ecosistemi vulnerabili sia per le pressioni antropiche che per i pericoli naturali (Gattacceca et al. 2009), sono spesso concentrate numerose attività produttive agricole e industriali. L'intrusione di acqua marina in acquiferi costieri non è un problema recente, basti pensare che il primo modello fu sviluppato indipendentemente da Ghyben e Herzberg rispettivamente nel 1888 e nel 1901. È vero, però, che negli ultimi trent'anni questo fenomeno ha ricevuto maggiore attenzione e su tale argomento sono stati pubblicati numerosi articoli e sviluppati svariati modelli

numerici e matematici (Frind 1986; Zheng et al. 1998; Acke-
rer et al. 1999; Abarca et al. 2007). Anche in Italia i lavori che si occupano della criticità degli acquiferi costieri sono molto numerosi, fra i quali: Giardi 1983; Pranzini 2002; Tessitore 2002; Barrocu 2003; Capaccioni 2005; Cau 2002; Antonellini 2008; questo ci offre un'indicazione di quanto siano diffuse nel nostro paese tali problematiche. In generale, possiamo affermare che il fenomeno interessa tutta l'Europa ed in particolare i Paesi dell'area mediterranea dove la salinizzazione è legata principalmente all'eccessivo sfruttamento delle falde acquifere (EEA 2003).

Il punto di partenza per affrontare correttamente tali situazioni è rappresentato, sicuramente, da una corretta gestione degli acquiferi, che deve necessariamente ispirarsi non solo a dei principi basilari quali la limitazione dei prelievi, la pianificazione sul territorio delle opere di presa, ma anche a strumenti previsionali, come appunto i modelli numerici. Il presente lavoro tratta il sistema acquifero poroso della pianura costiera compresa fra il Fosso Bufalina e Canale Burlamacca nel comune di Viareggio (LU) (Fig. 1). Tale area risulta essere interessata dal fenomeno dell'intrusione marina. Scopo dello studio è quello di arrivare, attraverso l'integrazione di metodologie stratigrafiche, idrogeologiche ed idrochimico-isotopiche alla formulazione di un modello concettuale qualitativo del sistema acquifero in oggetto. Sulla base del modello concettuale sarà implementato e calibrato un modello di flusso, base indispensabile per la successiva implementazione e realizzazione di un modello di trasporto, utile allo studio dell'intrusione marina.

Materiali e metodi

La realizzazione di un modello matematico il più possibile rappresentativo del sistema acquifero in studio passa per due fasi principali:

1. Realizzazione del modello concettuale del sistema reale al fine di avere uno strumento utile e affidabile per la gestione della risorsa idrica. Un modello numerico deve basarsi su un modello concettuale solido scaturito da un approccio multidisciplinare a carattere geologico-stratigrafico, idrogeologico e geochimico isotopico. Il modello concettuale rappresenta una schematizzazione della realtà che tiene conto dei fattori che concorrono a determinare il comportamento del sistema e la sua risposta a variazioni e sollecitazioni esterne. Tuttavia, tale schematizzazione, non dovrà essere troppo semplice per poter essere rappresentativa della realtà, ma neanche troppo complicata per evitare allungamenti dei tempi di calcolo. Questa fase del lavoro ha permesso di definire le caratteristiche idrostrutturali e idrodinamiche del sistema acquifero in esame e di comprendere i meccanismi che regolano gli aspetti quantitativi e qualitativi della falda, compresi i rapporti tra quest'ultima, i corsi d'acqua ed il mare. Tale fase ha previsto l'elaborazione delle informazioni stratigrafiche disponibili

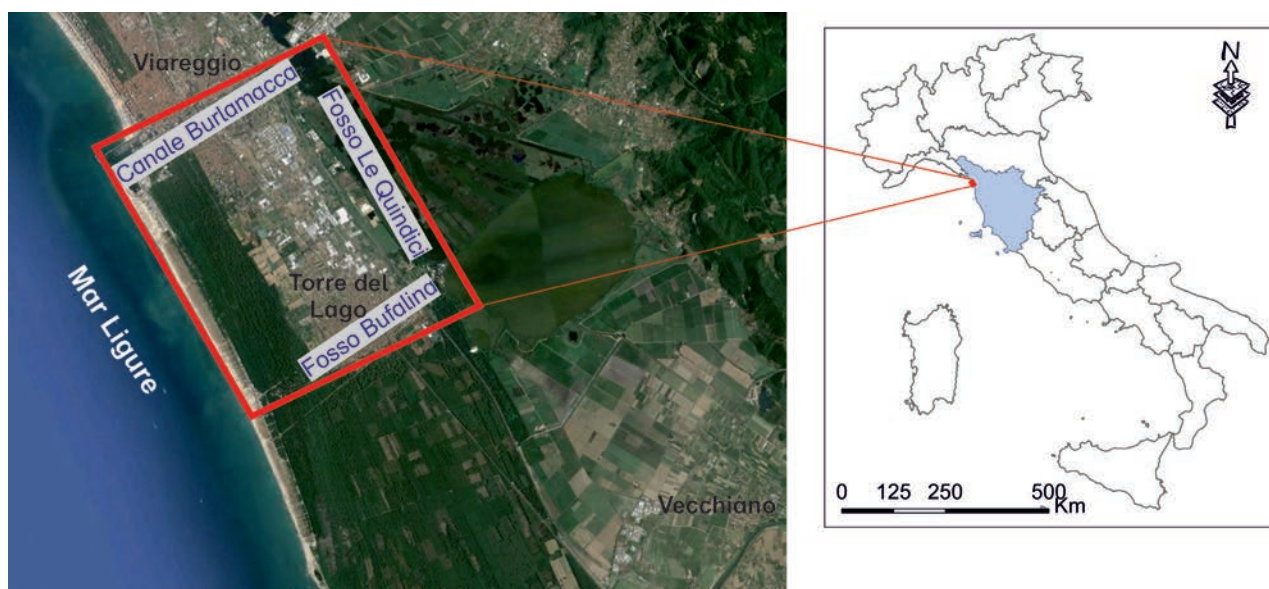


Fig. 1 - Area di Studio.

Fig. 1 - The study area

li (reperite nella Banca Dati Sottosuolo della Regione Toscana – BDSRI), dei risultati ottenuti dai precedenti studi idrogeologici e geochimici di letteratura (Doveri et al. 2009; Giusti 2006; Cavazza 2004; Duchi 1985), nonché la produzione di nuovi dati tramite lo svolgimento di “slug test” finalizzati ad incrementare le informazioni a riguardo della permeabilità idraulica. I dati geochimici ed isotopici sono stati tratti dallo studio di Doveri et al. (2009). In particolare per la caratterizzazione chimica isotopica sono disponibili parametri fisico-chimici misurati in concomitanza delle due campagne piezometriche (49 campioni a Ottobre 2005 e 45 a Maggio 2006), le analisi isotopiche su campioni d’acqua prelevati durante la campagna di Ottobre 2005 e le analisi chimiche ed isotopiche sui campioni prelevati a Maggio 2006. In totale i punti d’acqua indagati sono 52 (ubicati come in Fig. 2) tra cui 6 relativi ad acque superficiali corrispondenti al Canale Burlamacca, Fosso della Bufalina, Fosso Le Quindici e Fosso Guidario.

- Sulla base del modello concettuale appena delineato è stato realizzato il modello numerico di flusso dell’acquifero indagato. Per l’implementazione, lo sviluppo e la calibrazione del modello numerico di flusso è stato utilizzato il codice di calcolo ModFlow, *Modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model*, (Mc Donald e Harbaugh 1988), modello a differenze finite che simula il flusso di acque sotterranee nelle tre dimensioni spaziali (X,Y,Z). Tale codice incorpora i modelli bi e tridimensionali descritti da Trescott (1975), Trescott e Larson (1976), Trescott, Pinder e Larson (1976) e ampiamente utilizzati dall’USGS. In questo lavoro è stata utilizzata l’interfaccia grafica Visual ModFlow 2009.1 (Schlumberger, Water Services), che consente una rapida gestione ed una visualizzazione dei dati di input e/o output delle simulazioni.

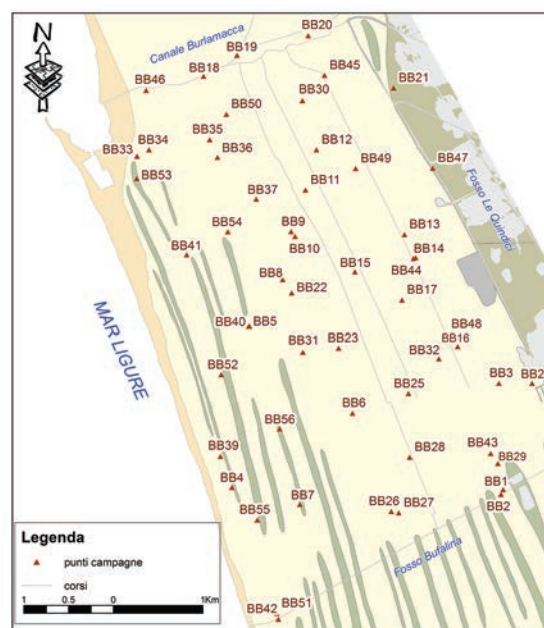


Fig. 2 - Ubicazione punti di misura.

Fig. 2 - Location of measurement points.

Modello concettuale

Dopo aver raccolto, analizzato e interpretato tutte le informazioni a disposizione per l’area in esame è stato possibile definire un quadro descrittivo del funzionamento del sistema acquifero in studio che verrà di seguito presentato.

Sulla base dei dati di sottosuolo disponibili sono state realizzate 9 sezioni stratigrafiche, 5 perpendicolari alla linea di costa e 4 parallele (in Fig. 3A), che hanno permesso di definire le geometrie ed i rapporti fra i diversi complessi idrogeologici che costituiscono il sistema acquifero. In particolare si individua un complesso idrogeologico costituito da sabbie, che

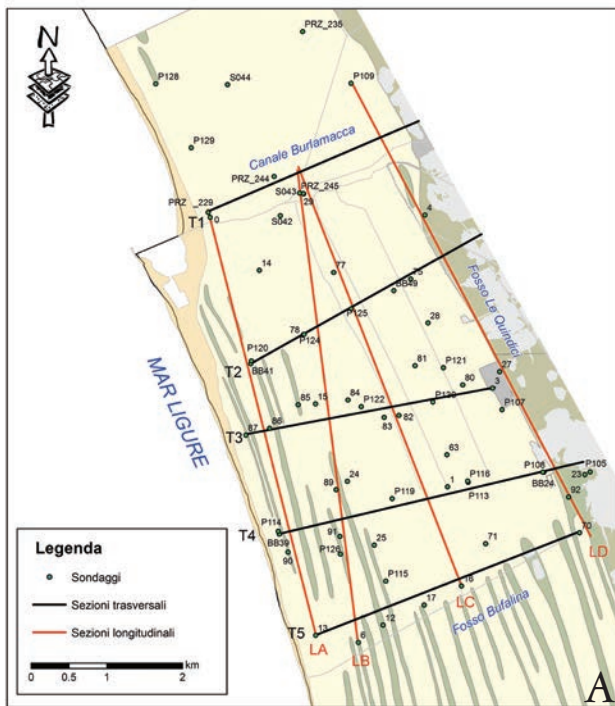


Fig. 3A - Ubicazione delle sezioni stratigrafiche .

Fig. 3A - Location of geological cross sections.

insieme a quello sabbio-limoso, ospitano l'acquifero freatico in studio; nonché un complesso caratterizzato da una granulometria limosa o limo-argillosa alle estremità meridionale e settentrionale dell'area di studio che funge da acquitardo (Fig. 3B). Un substrato impermeabile argilloso (acquicludo) è presente con continuità al di sotto dell'acquifero a profondità medie di 20-30 m, che nel settore a NE possono raggiungere valori dell'ordine dei 50 m. I dati di prove di emungimento reperiti in letteratura (Duchi 1985), unitamente ai risultati

ottenuti dagli *slug test* effettuati nel corso di questo studio indicano valori di conducibilità idraulica compresi tra 10^{-4} e 10^{-5} m/s per le sabbie e tra 10^{-5} e 10^{-6} m/s per le sabbie limose.

Per quanto riguarda i risultati desunti dalla realizzazione delle due campagne piezometriche, corrispondenti rispettivamente ad un periodo di magra (Ottobre 2005) (Fig. 4A) e di morbida (Maggio 2006) (Fig. 4B), è possibile osservare che la principale zona di ricarica del sistema indagato è rappresentata dalla fascia centrale, corrispondente all'alto morfologico delle dune sabbiose, corrispondente all'alto piezometrico sia nel periodo di magra che in quello di morbida. I minimi piezometrici, con valori al di sotto del livello del mare, si ritrovano sia nella fascia costiera, ed in particolare nella porzione meridionale, sia ad est a ridosso del sistema Fosso Le Quindici-Lago di Massaciucoli-laghi artificiali. Queste depressioni piezometriche sono da ricondurre probabilmente agli elevati emungimenti, rispettivamente, degli stabilimenti balneari di Marina di Torre del Lago e delle aziende florovivaistiche dell'area immediatamente a sud-ovest del Fosso Le Quindici. In entrambe le zone è dunque favorita l'entrata in l'acquifero di acque saline, in un caso attraverso l'interfaccia acqua dolce-acqua salata lungo la linea di riva, nell'altro per richiamo di acque dal sistema dei laghi artificiali (cave), nel quale è presente acqua di mare per risalita dal Canale Burlamacca (Doveri et al. 2009). Per quanto riguarda i rapporti tra l'acqua di falda e le acque superficiali si può notare che in tutta l'area, ad eccezione della zona di minimo piezometrico prossima al Fosso Le Quindici, si ha drenaggio dell'acquifero da parte dei fossi.

Le considerazioni desunte dalle carte piezometriche sono confermate dall'elaborazione dei dati di conducibilità elettrica delle acque sotterranee e superficiali (Fig. 5A,B). In corrispondenza dell'alto piezometrico (zona di ricarica), infatti, si hanno valori bassi di conducibilità che indicano la presenza prevalen-

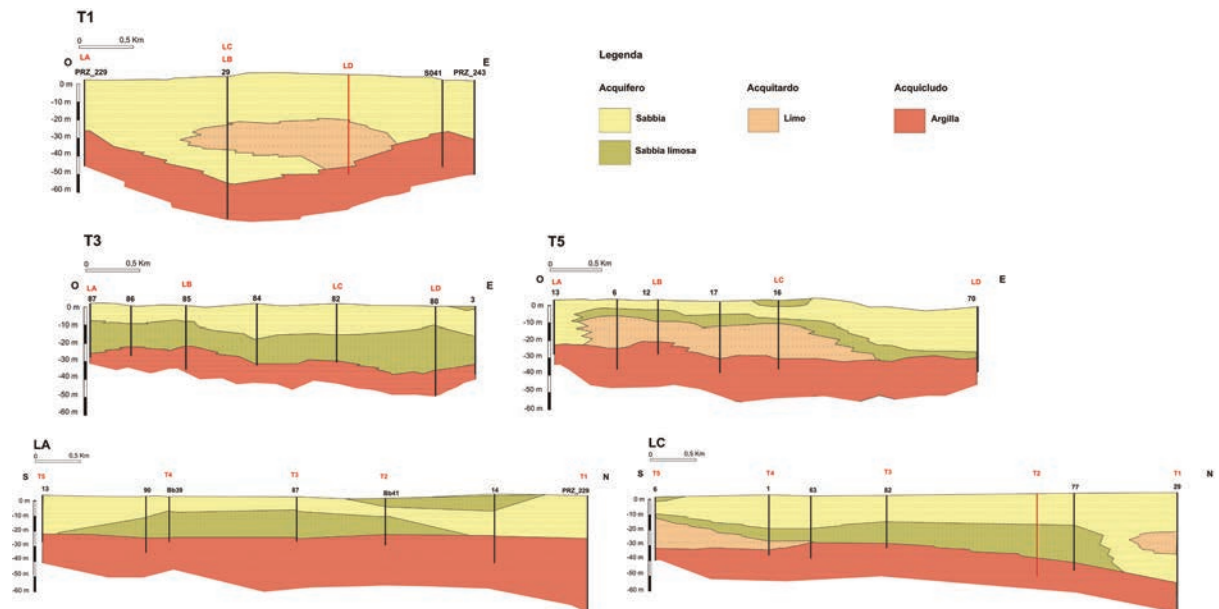


Fig. 3B - Sezioni stratigrafiche. Sono riportate solo cinque delle nove sezioni realizzate.

Fig. 3B - Geological cross sections. The figure shows only five of the nine sections made.

temente di acqua meteorica, mentre nelle zone corrispondenti ai minimi si registrano elevate conducibilità delle acque indicative di un mescolamento tra acque di falda e acqua di mare.

Questa configurazione è confermata anche dalla elaborazione dei dati chimici ed isotopici. In particolare da quest'ultimi è stato possibile quantificare l'entità dei vari mescolamenti per quei campioni che ne sono maggiormente interessati. In figura 6 sono, infatti, rappresentate le curve di mescolamento tra le acque dolci locali e quelle del Lago Massaciuccoli e tra le acque dolci e quella di mare, ed è interessante osservare come si posizionano i campioni rispetto a queste linee in modo tale da avere una chiara indicazione sui processi in atto nell'area in studio.

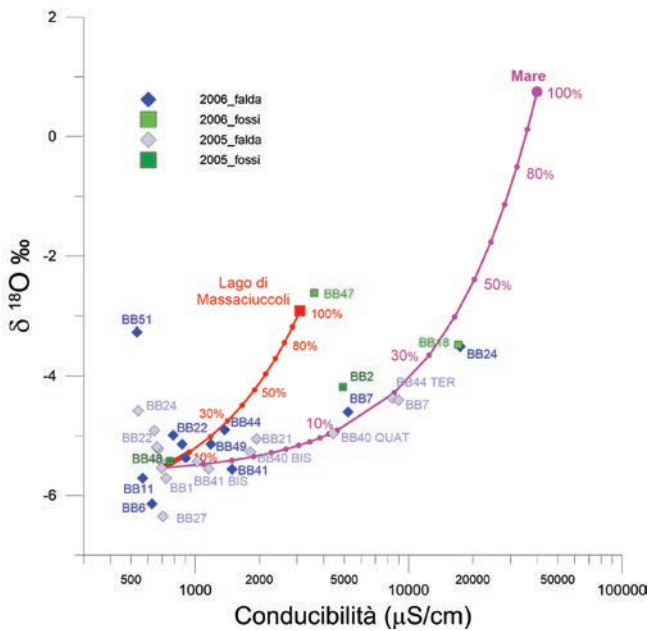


Fig. 6 - Diagramma Isotopi Ossigeno-18 vs. Conducibilità (µS/cm a 20°C) (Doveri et al. 2009).

Fig. 6 - Oxygen-18 isotopes vs. Conductivity (µS/cm a 20°C) (Doveri et al. 2009).

Per quanto riguarda le acque superficiali (Fig. 7), le quali hanno mostrato una salinità elevata, risulta evidente che le acque del Fosso Le Quindici (BB47) provengono dal Lago di Massaciuccoli (la cui salinità è perlopiù da attribuire al fenomeno dell'evaporazione ed a cause antropiche; Baneschi, 2005 e 2006), quelle del Canale Burlamacca (BB18), invece, sono influenzate dalla risalita di acqua di mare lungo il canale stesso mentre in quelle del Fosso della Bufalina (BB2) coesistono le acque del lago e di mare. Considerando i punti rappresentativi delle acque di falda vediamo che è confermata la presenza di ingressione marina lungo costa come già visto con la chimica generale, in particolar modo tale processo è evidente per i campioni BB7 e BB40 ubicate nel settore occidentale e i punti BB24 e BB44 per il settore orientale. Questa configurazione evidenzia come l'ingressione di acqua di mare nel Canale Burlamacca si spinga fino alla cave e da queste verso l'acquifero.

In definitiva, quindi, l'area in esame risulta vulnerabile rispetto ad una duplice intrusione marina, dalla costa e dal sistema idrologico Laghi artificiali (cave) -Fosso della Bufalina (Fig. 8).

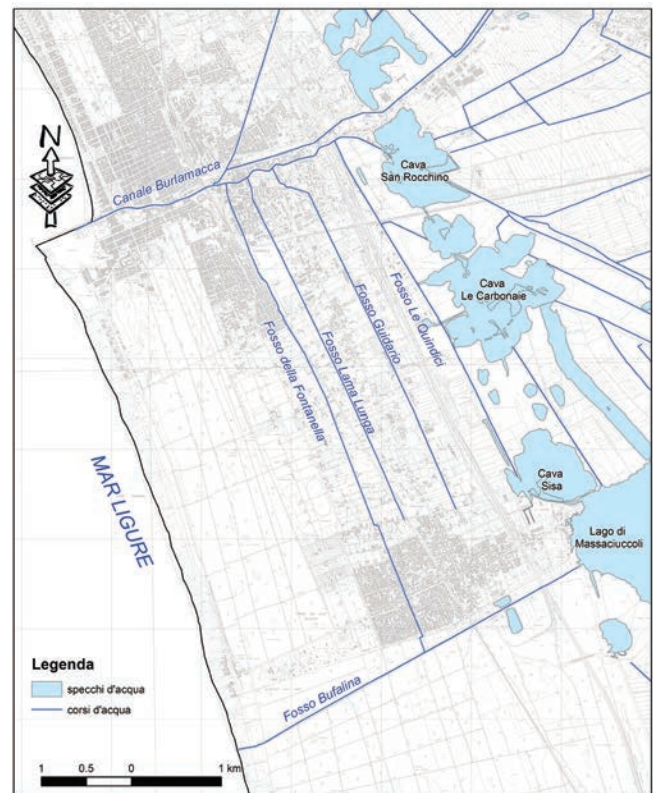


Fig. 7 - Idrografia dell'area in studio.

Fig. 7 - Hydrography of the study area.

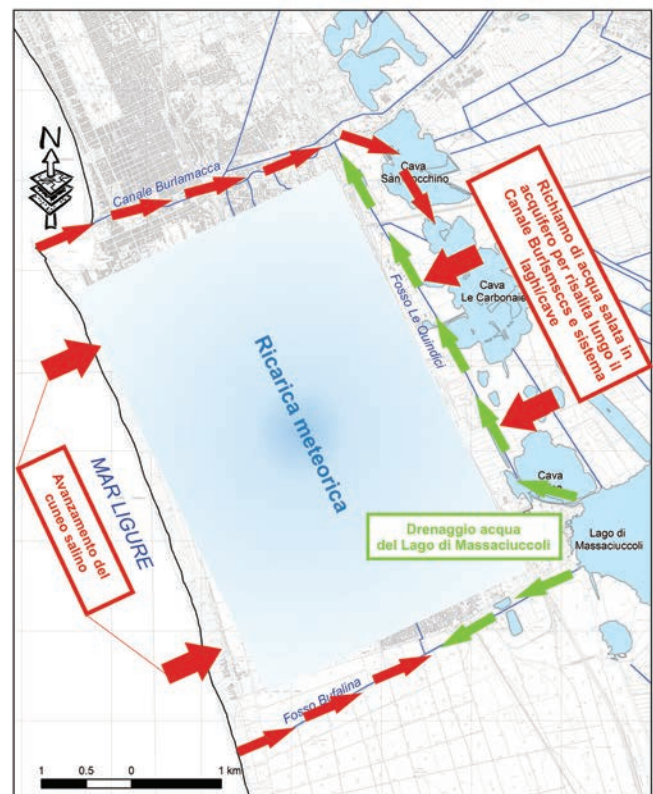


Fig. 8 - Modello concettuale di circolazione sotterranea del sistema in studio.

Fig. 8 - Hydrogeological conceptual model of the study area.

Modello numerico

Per la realizzazione del modello di flusso è stato utilizzato il codice di calcolo tridimensionale alle differenze finite ModFlow (Mc Donald e Harbaugh 1988). Il moto tridimensionale dell'acqua in un mezzo poroso è descritto dalla seguente equazione alle differenze finite:

$$\delta/\delta x(K_{xx}\delta h/\delta x)+\delta/\delta y(K_{yy}\delta h/\delta y)+\delta/\delta z(K_{zz}\delta h/\delta z)+W=S_s\delta h/\delta t$$

dove K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} sono i valori di conducibilità idraulica lungo le direzioni x, y, z che sono state assunte parallele agli assi maggiori della conducibilità idraulica (LT^{-1}); h 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).

L'equazione sopra riportata, insieme alle condizioni al contorno di carico idraulico e/o di flusso e con le condizioni di carico idraulico iniziali, costituisce la rappresentazione matematica di un sistema di flusso delle acque sotterranee. Ad eccezione di alcuni rari casi molto semplici, l'equazione non può essere risolta con semplici soluzioni analitiche, per questo motivo sono stati sviluppati vari metodi di calcolo che forniscono soluzioni più o meno approssimative. Un metodo è quello delle differenze finite in cui il sistema continuo, descritto dall'equazione, viene rimpiazzato da un set finito di punti discreti sia nello spazio che nel tempo e le derivate parziali sono sostituite da termini calcolati dalle differenze di carico idraulico in questi punti. Da questo processo si ottengono sistemi di equazioni algebriche lineari di differenze, la cui soluzione porta al valore di carico idraulico negli specifici punti del sistema. Rispetto alla soluzione analitica dell'equazione, questi valori rappresentano una approssimazione alla distribuzione del carico idraulico variabile nel tempo.

In base a quanto detto il sistema acquifero viene quindi discretizzato nelle tre direzioni spaziali con una suddivisione in righe e colonne sul piano xy ed in strati sul piano z.

ModFlow permette la simulazione sia in regime di flusso stazionario che in regime di flusso transiente. Relativamente a quest'ultimo, nel metodo a differenze finite tutte le variabili vengono discretizzate e quindi è richiesta anche una discretizzazione del dominio tempo; il tempo di interesse viene quindi suddiviso in intervalli discreti "time step".

Nel caso specifico è stato sviluppato un modello di flusso sia in regime stazionario, sia in regime transiente. In particolare, nel regime transiente è stato discretizzato il periodo Gennaio 2000 - Dicembre 2012 mediante 156 "stress period" con durata mensile suddivisi in 5 "time step" ciascuno.

Discretizzazione orizzontale

L'area in studio si estende verso l'entroterra per circa 4 km e parallelamente alla costa per 6 km. La discretizzazione orizzontale della zona ha previsto la costruzione di una griglia composta da 120 righe e 80 colonne per un totale di 9600 celle di 50x50 m (Fig. 9A)

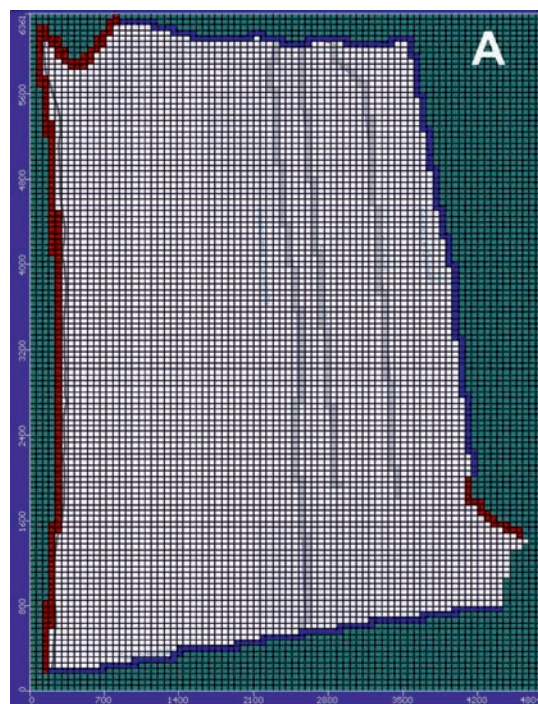


Fig. 9A - Griglia di discretizzazione orizzontale del modello numerico, dreni in grigio, river in blu, constant head in rosso, celle inattive in verde scuro.

Fig. 9A - Horizontal discretization of the numerical model with drains in gray, river in blue, constant head in red, inactive cells in dark green.

Discretizzazione verticale

La discretizzazione verticale consiste nella definizione delle geometrie del sistema acquifero in esame che è stato rappresentato da 5 layers, con spessori variabili in modo da simulare la variazione di spessore dei complessi idrogeologici che costituiscono il sistema acquifero in studio.

Definizione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno

Il livello piezometrico iniziale del modello in regime stazionario è stato fatto coincidere con la quota topografica mentre in regime transitorio le condizioni iniziali sono state fatte coincidere con l'output del modello in regime stazionario.

I confini dell'area modellizzata sono rappresentati verso ovest dalla linea di riva, verso est dal Fosso Le Quindici, Cava Sisa e Lago di Massaciucoli, mentre rispettivamente a nord e a sud fanno da confine il Canale Burlamacca e il Fosso della Bufalina. In figura 9A sono riportate le varie tipologie di condizioni al contorno utilizzate per la realizzazione del modello di flusso e di seguito descritte: 1) celle a flusso nullo (condizione al contorno del II tipo) per il Lago di Massaciucoli, in quanto, sulla base delle indicazioni fornite dal modello concettuale, non sembra essere interessato da scambi idrici significativi con il sistema acquifero nella porzione in studio; 2) celle a carico costante ("Constant Head"- condizioni al contorno di I tipo) per la Cava Sisa (-0.02 m s.l.m. - valore determinato sulla base dei dati della stazione idrometrica di Torre del Lago appartenente alla rete di monitoraggio del Servizio Idrologico Regionale) e la linea di costa (0 m s.l.m.);

3) celle con condizione di flusso dipendente dal carico (condizione al contorno del III tipo), in particolare è stato utilizzato il pacchetto “River”. Per impostare delle celle come “River” sono stati inseriti i seguenti parametri: i) valori del carico idraulico, scaturiti dall’elaborazione dei dati delle stazioni idrometriche Viareggio 1, Viareggio 2 e Torre del Lago appartenenti alla rete di monitoraggio del Servizio Idrologico Regionale, in particolare, per il modello in stato stazionario sono stati utilizzati il valore medio delle medie mensili, per lo stato transitorio i valori medi mensili registrati nel periodo modellizzato; ii) quota della base dell’alveo, calcolate sulla base di misure effettivamente eseguite in campagna; iii) larghezza e lunghezza del tratto di fiume nella cella considerata, stimate sulla base di immagini satellitari e misurazioni sul campo; iv) spessore e conducibilità idraulica del letto del fiume, stimati sulla base di dati di letteratura e conoscenza del territorio; in particolare, lo spessore è stato impostato pari a 1 m, mentre la permeabilità del letto del fiume è stata impostata pari a $1 \cdot 10^{-05}$ m/s per il Fosso della Bufalina, $5 \cdot 10^{-05}$ m/s per il Fosso le Quindici e variabile tra $5 \cdot 10^{-05}$ e $5 \cdot 10^{-07}$ m/s per il Canale Burlamacca.

Attribuzione delle proprietà delle celle

Ogni cella del modello di flusso realizzato, non già definita come cella inattiva o cella carico costante, è stata caratterizzata da un set di proprietà idrauliche, nello specifico sono stati attribuiti i valori di conducibilità idraulica (K_x , K_y , K_z) e coefficiente di immagazzinamento, che per un acquifero libero è noto come rendimento specifico (S_y) e può essere approssimato dal valore di porosità efficace dei sedimenti di cui è costituito l’acquifero. Tali proprietà sono state assegnate sulla base dei dati di letteratura e dai risultati ottenuti dai test idraulici di campagna (*slug tests*) effettuati nel corso di questo studio. In particolare, i valori di conducibilità idraulica inizialmente implementati al modello (Tab. 1) sono quelli ottenuti dai suddetti test unitamente ai dati delle prove di emungimento eseguite nella zona da Duchi (1985); per quanto riguarda il rendimento specifico sono stati invece utilizzati valori estrapolati da dati di letteratura (McWhorter e Sunada, 1977; Beretta, 1992).

Tab. 1 - Conducibilità idraulica utilizzata nella fase iniziale di implementazione del modello.

Tab. 1 - Initial hydraulic conductivities of the model.

	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)
argille	1E-09	1E-09	1E-10
limo	1E-07	1E-07	1E-08
sabbie limose	0.000001	0.000001	1E-07
sabbie	0.0001	0.0001	0.00001

Perturbazioni esterne al sistema

Quell’insieme di fattori esterni al sistema idrogeologico, ma in grado di condizionarne il comportamento e lo stato fisico reale vengono definiti come perturbazioni esterne e sono rappresentate dalla ricarica, evapotraspirazione, dreni e pozzi. Le

perturbazioni esterne nel modello in regime stazionario sono state considerate costanti nel tempo, mentre, nel modello in regime transitorio sono state discretizzate nel tempo come di seguito specificato.

- Ricarica - la ricarica, importante voce in ingresso ad un sistema acquifero, è rappresentata come condizione al contorno di II tipo. Il valore di ricarica assegnato al primo layer, mediante il pacchetto “Recharge”, è stato calcolato sulla base delle serie temporali di 5 stazioni meteorologiche ubicate in prossimità dell’area in studio. Relativamente allo stato stazionario è stato utilizzato il valore medio annuale sulla base dai dati pluviometrici riferiti a 59 anni (periodo: 1954-2012); mentre per quello in regime transiente sono stati utilizzati i valori cumulati mensili relativi al periodo modellizzato (Gennaio 2000-Dicembre 2012). Questi valori sono stati moltiplicati per un coefficiente di infiltrazione potenziale (C.I.P.; Tab. 2) che assume valori diversi sulla base del tipo di copertura del suolo (aree boschive, aree agricole e aree urbane) (Fig. 9B).

Tab. 2 - Valori dei coefficienti di infiltrazione potenziale corrispondenti ai diversi tipi di copertura del suolo.

Tab. 2 - Coefficients of potential infiltration consistent with the different types of soil cover.

Uso Suolo	C.I.P.
Area Boschiva	0.55
Area Urbana	0.4
Area Agricola	0.5

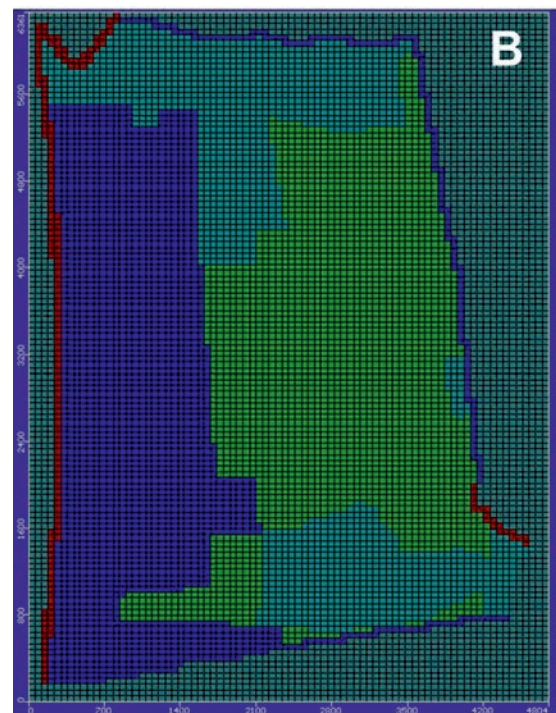


Fig. 9B - Uso del suolo: area boschive in blu, area agricola in verde, area urbana in color petrolio.

Fig. 9B - Land use: forested area in blue, agricultural area in green, urban area in oil green color.

- **Evapotraspirazione** - i valori di evapotraspirazione potenziale, calcolati con la formula di Thornthwaite (1948) sulla base dei valori meteorologici forniti da 4 stazioni con record di dati di 48 anni (1965- 2012), sono stati implementati nel modello mediante il pacchetto *Evapotranspiration*. In particolare, per il modello in regime stazionario è stato considerato il valore medio annuo, mentre per il transiente sono stati utilizzati i valori medi mensili. Inoltre, i valori calcolati sono stati moltiplicati per un coefficiente K che assume valori diversi a seconda della copertura del suolo (aree boschive, aree agricole e aree urbane; Fig. 9B e Tab. 3) sulla base di quanto indicato in uno studio del "Ministero dell'Ambiente e di Tutela del territorio e Provincia Autonoma di Trento" (2004).

Tab. 3 - Valori dei coefficienti K relativi all'evapotraspirazione corrispondente ai diversi tipi di copertura del suolo.

Tab. 3 - Coefficients K consistent with evapotranspiration for different types of soil cover.

Uso Suolo	K
Area Boschiva	0.9
Area Urbana	0.3
Area Agricola	0.65

- **Dreni** - gli altri principali corsi d'acqua presenti nell'area in studio, Fosso Guidario, Fosso Lama Lunga e Fosso della Fontanelli, sono stati modellizzati come condizioni al contorno di III tipo attraverso il pacchetto "*Drain*" che simula l'azione di fossi di drenaggio che tolgono acqua dall'acquifero quando il livello della falda è più alto dell'altezza del dreno. Non avendo a disposizione misure effettive dei livelli idrometrici e considerando che tali corpi idrici svolgono un'azione di drenaggio per la bonifica dell'area in esame sono stati assegnati livelli idrometrici prossimi al livello del mare (Fig. 9A).
- **Pozzi** - L'azione dei pozzi in emungimento è stata rappresentata come condizione al contorno di II tipo mediante il pacchetto "*Well*". In particolare è stato reperito dal sito della Provincia di Lucca il file delle concessioni (aggiornato al 2013), di tutto il territorio provinciale dal quale è stato possibile estrarre quelle ricadenti nella zona in esame. Nella fattispecie sono stati analizzate in totale 718 concessioni. A causa della carenza delle informazioni sono state fatte delle stime sulla base delle poche informazioni contenute nel file delle concessioni, unitamente ad un'accurata analisi dell'utilizzo del suolo per la definizione del probabile numero effettivo di pozzi presenti nel territorio, tipologia e periodo di utilizzo, ed infine quantitativi emunti. Le portate dei vari pozzi per il modello in regime stazionario sono state assegnate considerando i quantitativi emunti in un anno e dividendo tale valore per i giorni dell'anno ottenendo quindi una portata media giornaliera. Per il modello in regime transitorio sono stati, invece, considerati i quantitativi emunti mensili.

Successivamente alla fase di implementazione è stata eseguita la fase di calibrazione e l'analisi di sensitività utilizzando il carico idraulico misurato durante le campagne piezometriche

dell'Ottobre 2005 e Maggio 2006 come *target* di calibrazione, nonché i dati registrati dal Dicembre 2007 dal piezometro denominato *Flor Export* (PZ, ubicato come da Fig. 10A) della rete di monitoraggio del Servizio Idrologico Regionale. Parte integrante della calibrazione è stata l'analisi di sensitività che consiste in una procedura in cui vengono modificati separatamente i parametri e si osserva quanto e come questi influenzino i risultati del modello. Ciò aiuta a comprendere come ciascun parametro potrebbe essere modificato per ottenere una sempre maggiore corrispondenza tra valori simulati e valori osservati. Sia per la calibrazione in regime stazionario che per quella in regime transitorio è stato utilizzato il metodo manuale "*trial and error adjustment*", consistente in una procedura iterativa per fasi che prevede l'aggiustamento manuale dei parametri e il confronto tra dati simulati e sperimentali fino al raggiungimento della soluzione migliore. La procedura ha previsto principalmente la modifica della conducibilità idraulica in quanto è risultata essere il parametro più sensibile. In tabella 4 sono riportate le permeabilità idrauliche utilizzate nella calibrazione finale del modello di flusso.

Tab. 4 - Conducibilità idraulica utilizzata nella calibrazione finale.

Tab. 4 - Hydraulic conductivity used in calibration.

	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)
argille	1E-09	1E-09	1E-10
limo	6E-06	6E-06	6E-07
sabbie limose	0.00008	0.00008	0.00001
sabbie	0.0003	0.0003	0.0003

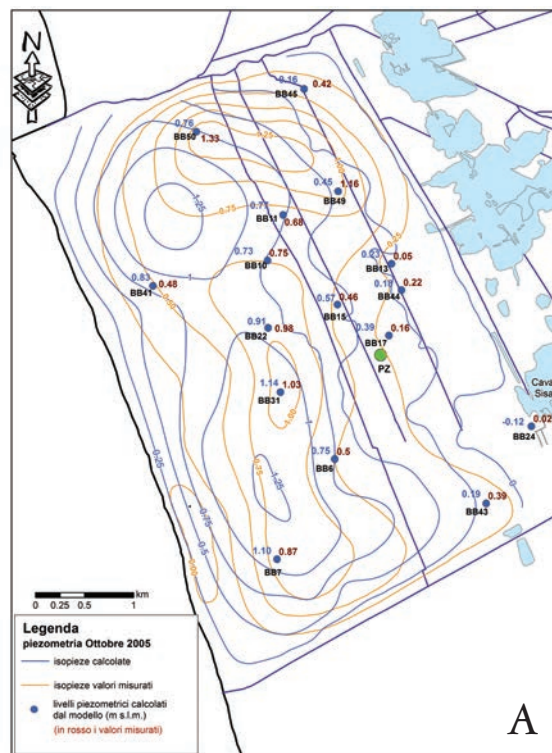


Fig. 10A - Risultati del modello in regime stazionario. Confronto tra le piezometriche.

Fig. 10A - Results of the model in steady state. Comparison of piezometers.

Risultati e discussione

Nel caso del modello in regime stazionario l'obiettivo della calibrazione è stato quello di ottenere una piezometria calcolata (in blu) il più possibile coincidente con quella sperimentale ottenuta da una media delle piezometrie a nostra disposizione, ovvero il valore piezometrico medio fra quello misurato in Ottobre 2005 e Maggio 2006 (in arancione; Fig.10A).

Come è possibile osservare dalla mappa le due piezometrie presentano una buona correlazione per quanto riguarda i due alti piezometrici. Per quanto riguarda i minimi, invece, si registrano le differenze maggiori: il minimo osservato nella piezometria media, posto nell'area meridionale in prossimità della costa, non viene adeguatamente simulato dal modello, probabilmente a causa della presenza lungo la costa di un limite al contorno di tipo forte come il "constant head", mentre i tre minimi individuati dal modello non si osservano nella piezometria media. In particolare quest'ultimi ricadono laddove non sono presenti punti di misura delle piezometrie che potrebbero confermare la presenza di tali minimi piezometrici.

Un ulteriore paragone tra le soluzioni del modello e le condizioni reali può essere effettuato mediante l'utilizzo di "observation wells" confrontando i valori misurati (medi delle due campagne) rispetto a quelli calcolati. Unitamente all'analisi statistica dei residui e la stima dell'errore in questi punti di controllo. Dal grafico (Fig.10B) è possibile osservare che la dispersione dei punti intorno alla retta rappresentativa del rapporto 1:1 fra calcolato e simulato risulta essere circa omogenea ($R=0.891$) e si ha un errore medio e massimo di 0.02 e -0.365 m rispettivamente, con un errore medio assoluto 0.179 m. La calibrazione in regime transitorio è stata effettuata confrontando i risultati con le misure delle campagne piezometriche di Ottobre 2005 e Maggio 2006 unitamente ai livelli piezometrici misurati dal piezometro appartenente alla rete di monitoraggio del Servizio Idrologico Regionale (dati giornalieri da Dicembre 2007 a Dicembre 2012) di seguito denominato PZ (in verde in Fig.11A).

Per quanto riguarda il periodo di magra (Ottobre 2005), la piezometria misurata (in arancione) e quella calcolata dal

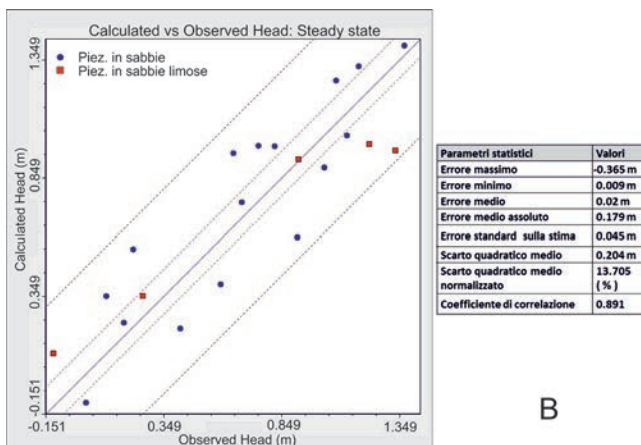


Fig. 10B - Risultati del modello in regime stazionario. Grafico di correlazione e parametri statistici.

Fig. 10B - Steady state model results. Correlation graphic and statistics.

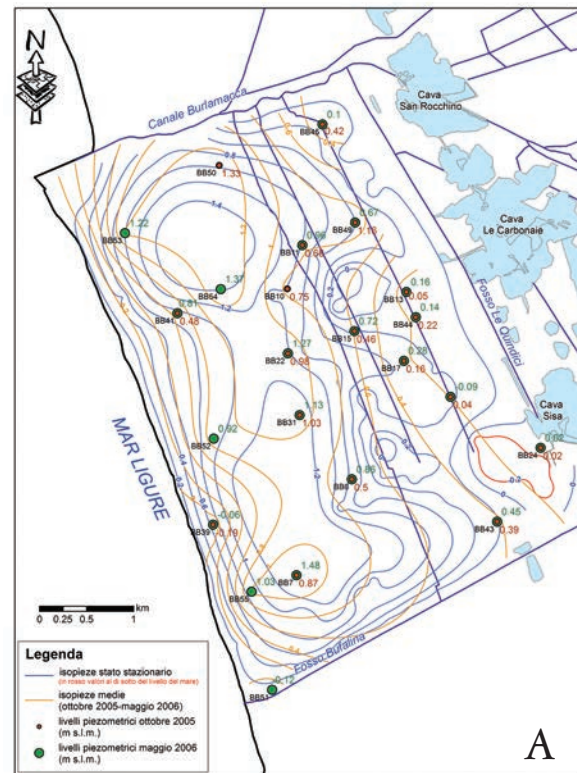


Fig. 11A - Risultati del modello in regime transitorio (Ottobre 2005). Confronto tra le piezometrie.

Fig. 11A - Transient model results (October 2015). Comparison of piezometers.

programma (in blu; Fig.11A) risultano in generale confrontabili sia dal punto di vista della morfologia sia dei livelli idrici. Le maggiori differenze riguardano sia il minimo lungo costa, non riconosciuto dal modello, probabilmente dovuto alle stesse motivazioni indicate nel paragrafo precedente per lo stato stazionario, sia la posizione del massimo nel settore settentrionale. La presenza di questo massimo piezometrico nella piezometria misurata è dovuto ai punti BB49 e BB50. Risulta doveroso sottolineare che tali misure sono state eseguite a seguito di eventi meteorici pari ad oltre 40 mm. Inoltre il valore misurato per il BB49 risulta addirittura più alto rispetto alla campagna di morbida successivamente descritta. Questi valori misurati potrebbero quindi essere inficiati dalle piogge cadute in abbondanza nei giorni antecedenti alla misura e quindi non essere rappresentativi della piezometria di magra in questione.

Dal grafico di correlazione (Fig.11B), dal quale sono stati eliminate tali misure non significative, è possibile osservare che i punti hanno una distribuzione piuttosto omogenea intorno alla retta rappresentativa del rapporto 1:1 con un R di 0.882. L'errore massimo è pari a 0.348 m, mentre l'errore medio assoluto 0.163 m.

Per quanto riguarda il periodo di morbida (Fig.12A) le due piezometrie risultano del tutto confrontabili sia per quanto riguarda la morfologia che i valori dei livelli piezometrici. Le differenze maggiori si hanno lungo la costa, sia per quanto riguarda il minimo assoluto del settore meridionale, come per la precedente campagna, sia per il punto BB53 che pre-

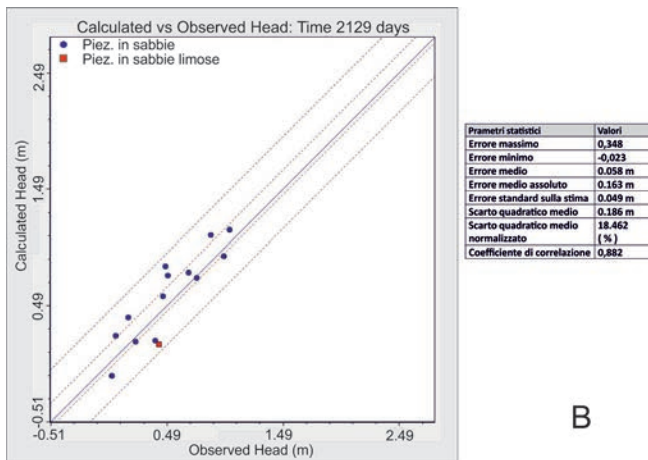


Fig. 11B - Risultati del modello in regime transitorio (Ottobre 2005). Grafico di correlazione e parametri statistici.

Fig. 11B - Model results in transient conditions (October 2005). Correlation graphic and statistical parameters.

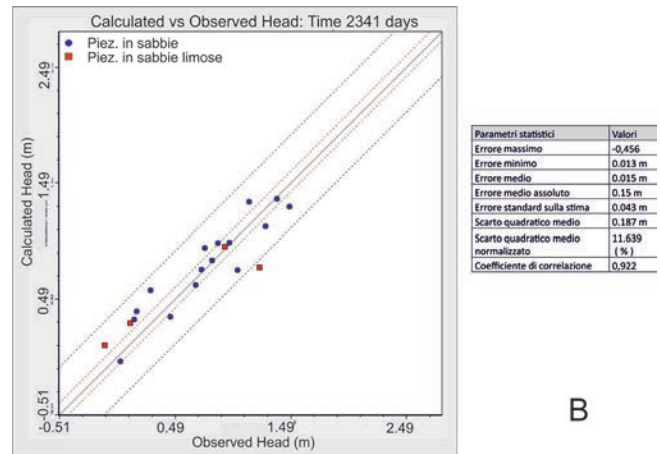


Fig. 12B - Risultati del modello in regime transitorio (Maggio 2006). Grafico di correlazione e parametri statistici.

Fig. 12B - Model results in transient conditions (May 2006). Correlation graphic and statistical parameters.

senta l'errore massimo di -0.46 m. La dispersione lungo la retta rappresentativa del rapporto 1:1 fra osservato e calcolato (Fig. 12B) presenta un coefficiente di correlazione pari a 0.922 e con un errore medio assoluto 0.15 m.

Come detto sopra per la calibrazione del modello in regime

transitorio sono stati inoltre utilizzati i dati in continuo rilevati dal Dicembre 2007 dal piezometro denominato *Flor Export* (PZ, ubicato come da figura 11A) della rete di monitoraggio del Servizio Idrologico Regionale. Sono stati considerati i dati giornalieri dal Dicembre 2007 al Dicembre 2012 anche se in questo intervallo temporale sono presenti numerosi periodi con interruzione delle registrazioni.

Come possibile osservare dal grafico (Fig. 13) si ha una buona corrispondenza tra i valori osservati del piezometro e quelli ricalcolati, con i livelli del PZ che generalmente sembrano anticipare il modello, ma con un andamento sostanzialmente analogo. Questo sfasamento potrebbe essere dovuto a disomogeneità locali del coefficiente di immagazzinamento che porta ad una diversa risposta idrodinamica e che, però, non risulta definibile sulla base dei dati a disposizione, oppure alla scelta della scala temporale utilizzata.

Il periodo di maggiore criticità corrisponde ai primi cinque mesi di registrazione dello strumento (da Dicembre 2007 a Aprile 2008) in cui, come si vede chiaramente dal grafico, i dati del PZ sono più elevati di quelli restituiti dal modello che proprio in quel periodo registra un minimo assoluto. Per cercare di comprendere se i risultati del modello presentano degli errori si è eseguito uno studio del regime pluviometrico in funzione dei livelli piezometrici ricalcolati dal modello e quelli misurati da PZ. Nel periodo antecedente al minimo assoluto calcolato dal modello si è verificata appunto un'annata particolarmente seccata preceduta (558 mm annui) a sua volta da un'altra annata con valore leggermente inferiore alla media (830 mm annui rispetto ad un valore medio annuo di 890 mm). Laddove invece si sono verificati periodi particolarmente piovosi il modello risponde congruentemente al regime pluviometrico mostrando i maggiori valori piezometrici. Nel periodo 2009 si può osservare peraltro che in PZ sono stati registrati livelli paragonabili a quelli di output del modello (errore di circa 0.10 m). Soffermandoci sui soli dati del PZ, si può inoltre osservare che i valori relativamente alti del periodo fine 2007-inizi 2008, registrati a seguire di un anno rela-

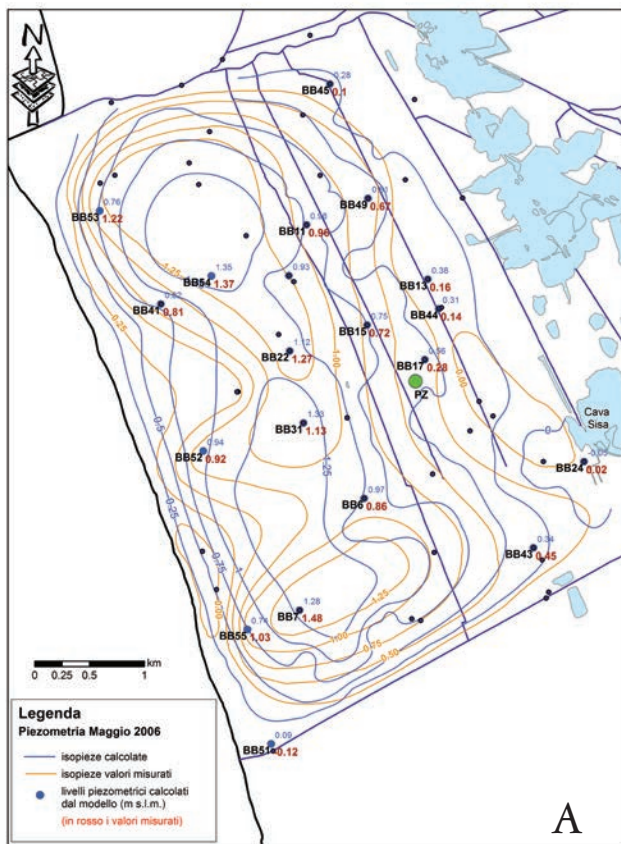


Fig. 12A - Risultati del modello in regime transitorio (Maggio 2006). Confronto tra le piezometrie.

Fig. 12A - Model results in transient conditions (May 2006). Comparison of piezometries.

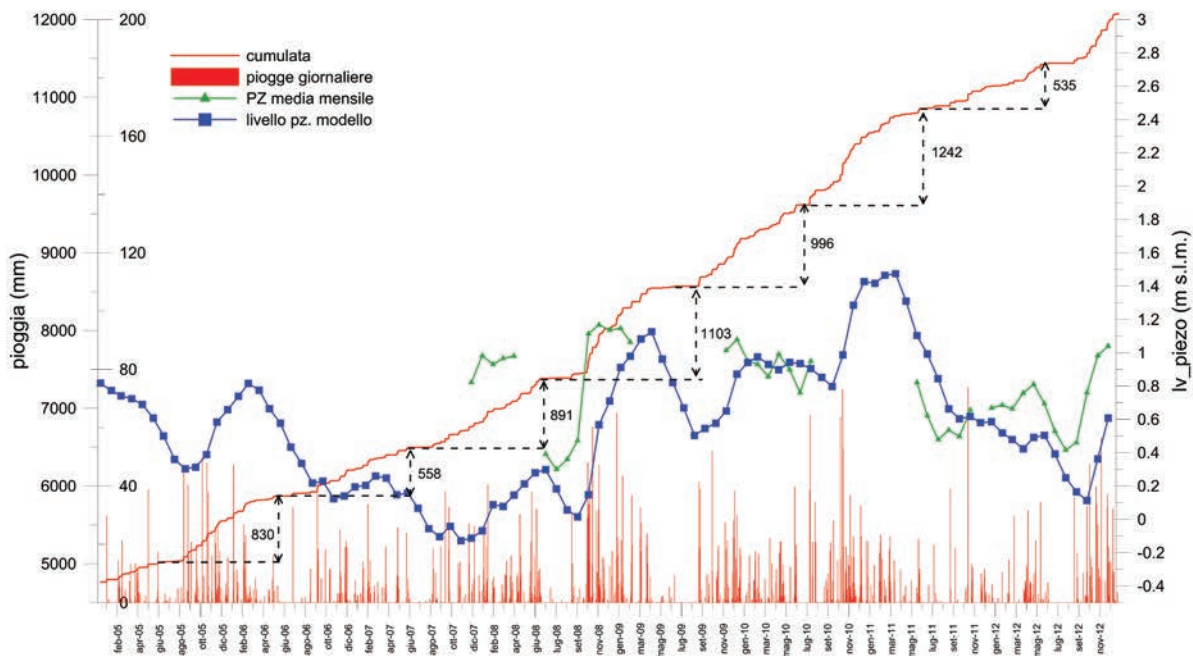


Fig. 13 - Confronto tra i valori di precipitazione giornalieri e la cumulata delle piogge (linea rossa), coi livelli piezometrici del PZ (come medie mensili) ed il valore del livello calcolato dal modello nella cella dove ricade il piezometro.

Fig. 13 - Comparison between daily and cumulated rainfall (red line), and water table of PZ (monthly average value) and the value simulated by the model.

tivamente siccitoso, risultano del tutto paragonabili a quelli misurati in anni con piovosità pressoché doppia.

Da quest'analisi sembra evidente che il modello risponde molto bene alle variazioni di ricarica registrate negli anni e che, al di fuori dei primi 5 mesi in questione, PZ sembra confermare tale andamento. Relativamente a questo periodo, peraltro immediatamente successivo all'installazione della stazione di monitoraggio, non è da escludersi che i dati registrati in PZ possano esser viziati da un qualche errore a carattere tecnico-strumentale (quale cattivo funzionamento della sonda o variazione del piano di riferimento, tra i primi mesi di registrazione ed i periodi successivi).

Conclusioni

L'obiettivo principale dello studio è stato quello di realizzare un modello matematico di flusso del sistema acquifero freatico sulla base di un modello concettuale definito mediante un approccio interdisciplinare, che ha tenuto conto degli aspetti meteorologici, geologici-stratigrafici, idrogeologici e geochimico-isotopici.

In definitiva l'elaborazione integrata stratigrafico-idrogeologico-geochimico isotopica svolta nell'ambito di questo lavoro, fornisce un significativo miglioramento al quadro conoscitivo dell'acquifero in esame e alla comprensione dei meccanismi che regolano gli aspetti quantitativi e qualitativi dell'acquifero (tra cui i rapporti fiume-falda e falda-acqua di mare).

Sulla base del modello concettuale è stato realizzato un modello numerico di flusso sia in regime stazionario sia in regime transitorio. Entrambi i modelli sono stati calibrati con il metodo manuale "trial and error adjustment" sulla base dei livelli

piezometrici misurati durante le campagne di Ottobre 2005 e Maggio 2006 (Giusti, 2006). Inoltre, i risultati del modello in regime transiente sono stati confrontati con i dati in continuo rilevati dal Dicembre 2007 al Dicembre 2012 dal piezometro della rete di monitoraggio del Servizio Idrologico Regionale presente nell'area in studio.

Il bilancio idrogeologico fornito dal modello conferma sostanzialmente il modello concettuale precedentemente delineato. In particolare, in figura 14 viene riportato il bilancio idrogeologico relativo a Maggio 2006 dove è possibile osservare che la ricarica del sistema acquifero avviene perlopiù per infiltrazione meteorica e che le principali uscite dal sistema sono costituite principalmente dai pompaggi, dal naturale deflusso sotterraneo verso mare ed i corsi d'acqua superficiali. Inoltre in tabella 5 vengono riportati i quantitativi delle principali voci in entrata ed in uscita al sistema relative ad Ottobre 2005 e Maggio 2006.

Le principali ipotesi testate per mezzo del modello numerico possono così riassumersi:

- La ricarica avviene principalmente per infiltrazione meteorica diretta in prossimità della fascia costiera, confermando quanto osservato nel modello concettuale;
- I corsi d'acqua presenti nell'area agiscono prevalentemente da dreni confermando quanto già osservato nel modello concettuale;
- I pozzi rappresentano una importante voce di uscita dal sistema acquifero in esame, con particolare riferimento a quelli appartenenti all'industria florovivaistica abbondantemente sviluppata nell'area (Fig. 14);

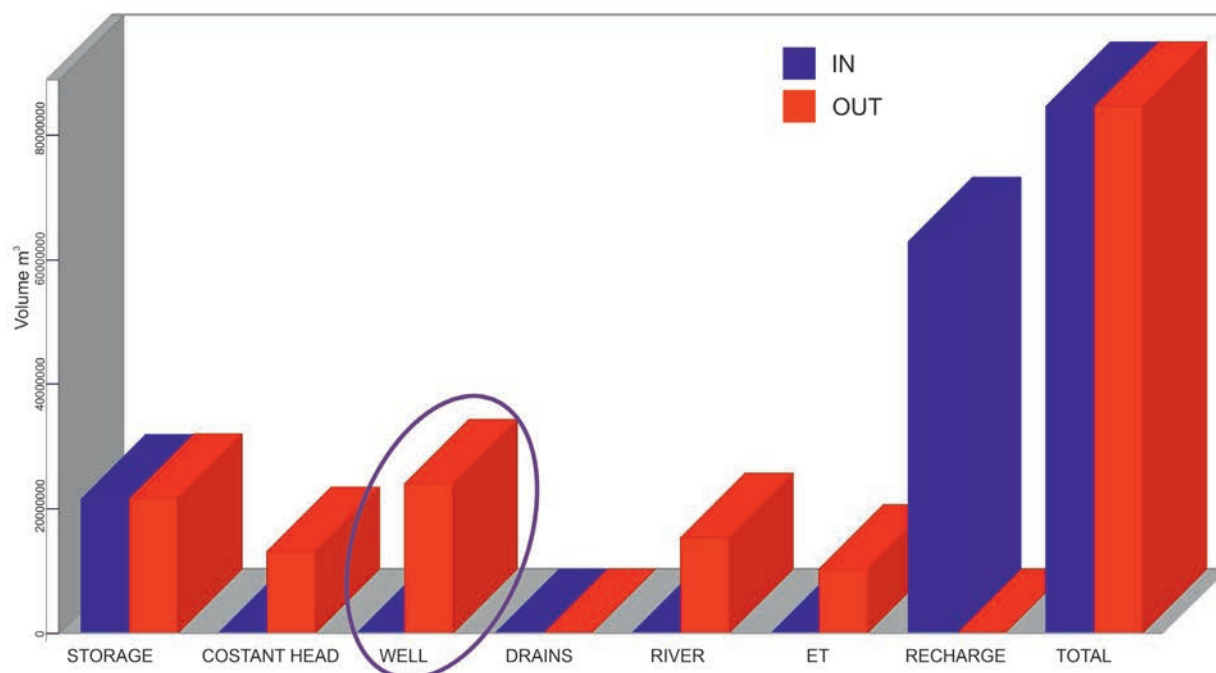


Fig. 14 - Bilancio idrogeologico restituito dal modello in regime transiente a Maggio 2006 (voci in entrata in blu e in uscita in rosso).

Fig. 14 - Hydrological transient model budget of May 2006 (blue=inflow, red=outflow).

- L'analisi di sensitività ha individuato la permeabilità delle celle e del letto del fiume come il parametro più sensibile, cioè quello che incide maggiormente sui risultati del modello;
- Nella fase di calibrazione è stato necessario variare sensibilmente i valori di conducibilità idraulica, fino ad ottenere K di $2 \cdot 10^{-4}$ m/s e $8 \cdot 10^{-5}$ m/s rispettivamente per le sabbie e le sabbie limose. Tali valori non differiscono tuttavia di molto da quelli reperiti in letteratura (relativi a prove di emungimento) e dai risultati ottenuti dagli *slug test*;
- Il "Constant head" rappresenta principalmente una voce in uscita dal sistema (Fig. 14) anche se è possibile osservare un flusso in entrata sia da Cava Sisa che dalla linea di costa (in accordo col modello concettuale).

Concludendo il modello numerico di flusso realizzato in questo lavoro è risultato essere sufficientemente rappresentativo del sistema acquifero in studio. La carenza di informazioni, fra le quali, i quantitativi effettivamente emunti, nonché prove idrauliche su pozzi/piezometri distribuite omogeneamente sul territorio e misure idrometriche in continuo sulla rete dei canali di bonifica, ha portato a dover effettuare alcune stime sui dati implementati nel modello. Una più dettagliata conoscenza dei suddetti aspetti comporterebbe un significativo miglioramento della rappresentatività del modello stesso. Tuttavia il modello di flusso ottenuto può ritenersi un utile strumento anche in termini di gestione/pianificazione dello sfruttamento della risorsa idrica. Il modello realizzato in questo studio costituisce inoltre una solida base di partenza per lo sviluppo di un modello di trasporto utile a controllare e gestire il fenomeno dell'ingressione marina.

Tab. 5 - Quantitativi delle voci del bilancio idrogeologico rispettivamente di Ottobre 2005 e Maggio 2006.

Tab. 5 - Hydrological budget of October 2005 and May 2006.

	OTTOBRE 2005		MAGGIO 2006	
	IN (m ³)	OUT (m ³)	IN (m ³)	OUT (m ³)
STORAGE	19,856,338	19,260,348	21,529,052	21,677,346
CONSTANT HEAD	67,228	11,718,449	71,182	13,132,004
WELLS	0	22,203,148	0	24,088,008
DRAINS	0	1,933	0	2,145
RIVER LEAKAGE	111,925	14,033,020	124,442	15,411,314
ET	0	9,590,356	0	10,325,626
RECHARGE	56,773,724	0	62,913,968	0
TOTAL	76,809,216	76,807,256	84,638,640	84,636,440

BIBLIOGRAFIA

- Abarca E., Jesu's Carrera J., Sanchez-Vila X., Voss C. (2007). Quasi-horizontal circulation cells in 3D seawater intrusion. *Journal of Hydrology* 339: 118–129.
- Ackerer PH, Younes A., Mose R. (1999). Modeling Variable Density Flow and Solute Transport in Porous Medium: 1. Numerical Model and Verification. *Transport in Porous Media* 35: 345–373.
- Anderson M.P., Woessner W.W. (1992). Applied groundwater modeling-Simulation of flow and advective transport. Academic Press Inc., San Diego (USA), 381 pp.
- Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G. (2008). Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy. *Hydrogeology Journal*, 16 (8): 1541 – 1556.
- Baneschi I., Guidi M., Zuppi G.M., (2005). Idrogeochimica delle zone profonde del Massaciucoli. "Hydrogeochemistry of deep zones of Massaciucoli". 2° Incontro dei Dottorandi in Scienze dei Sistemi Acquatici. Bertinoro, Italia.
- Baneschi I. (2006). Geochemical and Environmental study of a coastal ecosystem: Massaciucoli lake (Northern Tuscany, Italy). PhD. 'Ca Foscari' University of Venice.
- Barrocu G. (2003). Seawater intrusion in coastal aquifers of Italy, in J. Calaferra (Ed.), State of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers of the Mediterranean Coast, Alicante, pp. 207-223.
- Beretta G.P. (1992). Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee "Hydrogeology for the de-pollution of groundwater". Pitagora Editrice, Bologna
- Capaccioni B., Didero M., Paletta C., Didero L. (2005). Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwaters. *Journ. Hydrol.*, 307; 1 - 16, ISSN: 0022-1694
- Cau P., Lecca G., Muscas, Barrocu. G, Uras. G (2002). Saltwater intrusion in the plain of Oristano (Sardinia), 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, 6–10 May 2002, pp 435– 444.
- Cavazza S. (1984). Regionalizzazione geomorfologica del trasporto solido in sospensione dei corsi d'acqua tra il Magra e l'Ombrone "Geomorphological regionalization of sediment transport in suspension of the waterways between Magra and Ombrone". *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A*, 91: 119-132.
- Cavazza S., Cortopassi P., Crisci A., Duchi G., Simonetta J. (2002). Nuovi studi sulla crisi idrica e sulla salinizzazione a Viareggio e in Versilia "New studies on the water crisis and salinization in Viareggio and Versilia". Consorzio di Bonifica Versilia-Massaciucoli Comune di Viareggio-Amici della Terra Versilia.
- Doveri M., Giannecchini R., Giusti G., Butteri M. (2009). Studio idrogeologico-geochimico dell'acquifero freatico nella zona compresa tra il Canale Burlamacca ed il Fosso della Bufalina (Viareggio, Toscana) "Hydrogeological-geochemical study of the phreatic aquifer in the area between Burlamacca Canal and Bufalina Ditch (Viareggio, Tuscany)". *EngHydroEnv Geology* 12: 101-117.
- Duchi G. (1985). Rilievi analitici sulla perforazione di pozzi test trivellati in località Le Carbonaie, località La Morina, località Frasseti (Comune di Viareggio) finalizzati alla individuazione di flussi di acque salmastre alla base dell'acquifero "Analytical surveys on drilling wells test at Le Carbonaie, La Morina, Frasseti (Municipality of Viareggio) aimed at identifying flows brackish waters at the base of the aquifer". *Studio Idrogeologico della Piana Versiliese*, pp. 37-5
- EEA (2003). Europe, water: an indicator based assessment, Topic report 1.
- Franke O.L., Reilly T.E., Bennett G.D. (1987). Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems – An introduction: U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations 3-B5, 15 p.
- Frind E.O. (1986). Sea water intrusion in continuous coastal aquifer-aquitard system. *Proc.*, 3rd. Int. Conf. Finite element on Water Resource, University of Mississippi, Mississippi, pp 2177-2198.
- Gattacceca J. C., Vallet-Coulomb C., Mayer A., Claude C., Radakovitch O., Conchetto E., Hamelin B. (2009). Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: The southern Venice Lagoon coastland. *Journal of Hydrology*, 378: 46-61.
- Ghyben W.B. (1888). Notes on the probable results of the proposed well drilling near Amsterdam, in Dutch. *Tijdschrift van Let Koninklijk Inst. Van Ing.*
- Giardi M., Pranzini G., Serretti L. (1983). Salt water intrusion in the coastal plains of Versilia and Elba Island (Tuscany). *Geol. Appl. e Idrogeol.*, XVIII (2).
- Giusti G. (2006). L'intrusione marina nella fascia costiera versiliese-pisana. Studio idrogeologico e idrogeochimico della falda freatica nella pianura costiera versiliese compresa tra il Canale Burlamacca e il Fosso della Bufalina "The seawater intrusion in the coastal Versilia Pisan. Hydrogeological and hydrogeochemical study of groundwater in the coastal plain of Versilia between Burlamacca Canal and Bufalina Ditch". Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Università degli studi di Pisa.
- Herzberg A. (1901). The Water supply of parts of the North Sea coast in Germany, in German. *J. Gasbeleucht. Wasserversorg* 44, 815-819.
- Ministero della tutela dell'ambiente e del territorio e Provincia autonoma di Trento (2004). Comitato paritetico d'intesa (DPR n. 381/74, art.8). Piano generale di utilizzazione delle acque pubbliche "General plan for the use of public waters ". Parte seconda: Acque: quantità e qualità, pp 70.
- Mcdonald M.G., Harbaugh A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, USGS TWRI Chapter 6-A1, 586 pp.
- McWhorter, D.B., Sunada D.K. (1977). *Ground-Water Hydrology and Hydraulics*. Water Resources Publications, Colorado.
- Pranzini G. (2002). Groundwater salinization in Versilia (Italy). 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, 6–10 May 2002, pp 412–421.
- Tessitore S. (2002). Caratterizzazione idrogeologica e sviluppo di un modello numerico del sistema acquifero costiero della Versilia "Hydrogeological characterization and development of a numerical model of the coastal aquifer system of Versilia". PhD. Università degli studi di Pisa.
- Thomas E. Reilly, Arlen W. Harbaugh (2004). *Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models* Reston, Va. U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey; 2004.
- Thorntwaite C.W. (1948) – An approach toward a rational classification of climate. *The Geogr. Review*, 38: 55-94.
- Zheng C., and Wang P.P. (1998). MT3DMS, A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems: Vicksburg, Miss., Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers.