

Modellazione e simulazione numerica come utensili in idrogeologia: esempio di applicazione alla pianura costiera di Cecina

Ambrosio Michele, Fagioli Maria-Teresa **)

***) AF Geoscience and Technology Consulting - Via Toniolo, 222 56010 Campo (PI)

WEB Site: www.afgtec.com Email: afconsulting@afgtec.com

Introduzione

Negli anni 1995-1996, nell'ambito di un incarico (Province Pisa e Livorno - AF Studio geologico (ora AFgtec)) relativo all'elaborazione del bilancio idrogeologico del bacino del Fiume Cecina ed al rilevamento delle caratteristiche idrochimiche delle acque superficiali e sotterranee del bacino stesso, è stato impiegato lo strumento modellistico "Visual Modflow" per verificare la rispondenza alla realtà di alcune ipotesi formulate nell'elaborazione del bilancio idrogeologico della pianura, bilancio per la verifica del quale mancano dati diretti relativi al deflusso sotterraneo a mare.

L'implementazione della modellizzazione numerica, mai tentata precedentemente per l'area in studio, ha da un lato permesso di produrre una serie di scenari simulati con buona rispondenza alle realtà fisicamente osservate evidenziando dall'altro i limiti dello strumento, in particolare derivanti da carente o disomogenea distribuzione spazio-temporale dei dati di input.

1. Premessa

Un modello è un utensile disegnato per rappresentare una versione semplificata della realtà, studiarne le naturali tendenze evolutive e prevedere gli effetti delle perturbazioni esterne, ivi compresi, ovviamente, gli interventi antropici sulla realtà in questione.

Data una definizione così ampia è evidente che si utilizzano continuamente "modelli" nella vita di ogni giorno.

I modelli della dinamica delle acque sotterranee sono rappresentazioni schematiche di realtà generalmente molto complesse e, dove applicati e calibrati rigorosamente, si sono dimostrati strumenti previsionali di grande potenzialità per l'ottimizzazione della gestione della risorsa idrica sotterranea.

L'impiego delle simulazioni modellistiche consente infatti di collaudare "virtualmente" vari schemi di gestione e quantificare preventivamente gli effetti delle

azioni che si intendono intraprendere.

Naturalmente la validità ed il dettaglio delle previsioni saranno direttamente dipendenti da accuratezza, densità ed omogeneità di distribuzione dei dati di partenza.

Di seguito si descrive l'applicazione di "Modflow"



Fig. 1 Distribuzione dei pozzi utilizzati per l'elaborazione del modello idrogeologico della Piana costiera

(programma di modellazione numerica idrogeologica il cui motore fu realizzato e messo a punto dall'United States Geological Survey negli anni '70 e successivamente adattato ed integrato per l'uso su PC) ad una realtà idrogeologica complessa, interessata da tutte le problematiche tipiche delle aree costiere intensamente antropizzate: la pianura costiera del fiume Cecina (Toscana centrale).

2. Descrizione del modello

Modflow, è un programma di modellazione idrogeologica a differenze finite, che simula il flusso di acque

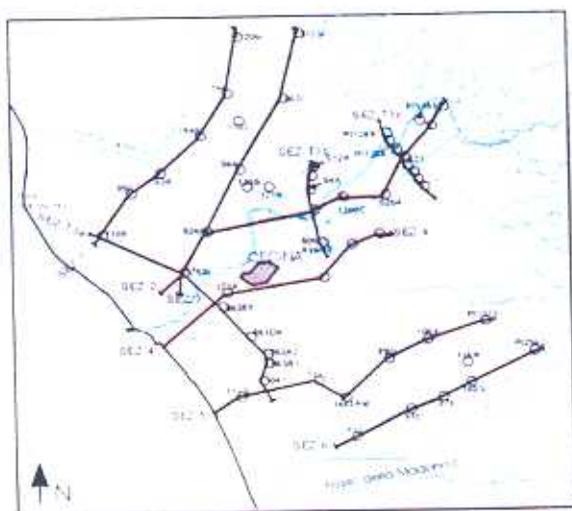
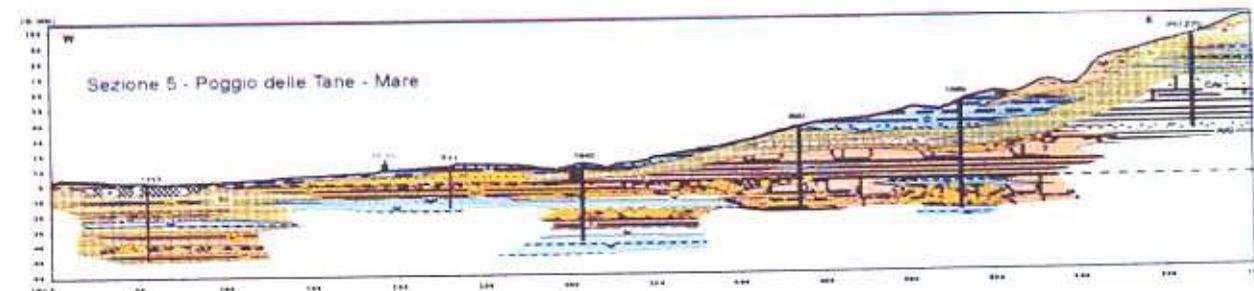
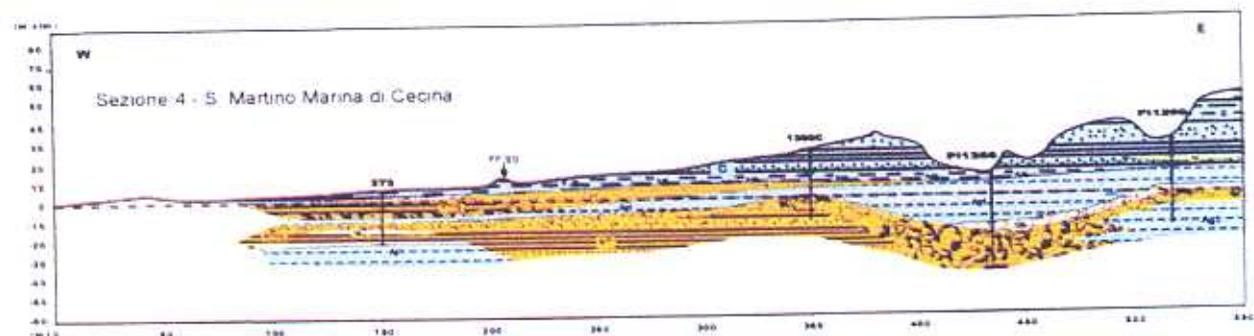
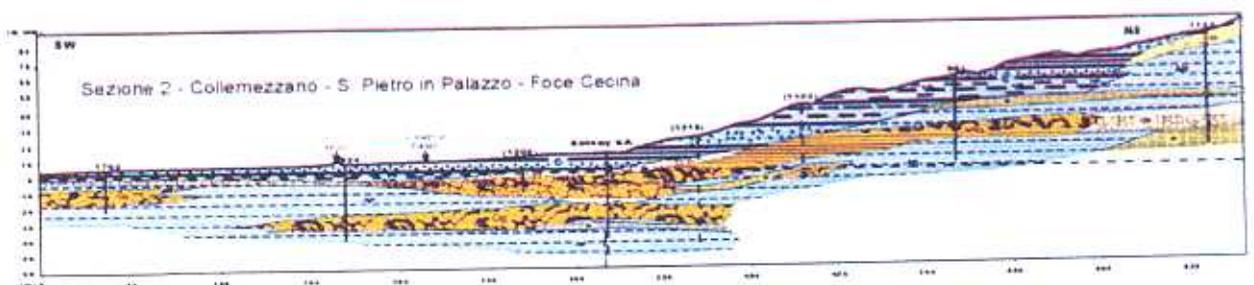


Fig 2a Ubicazione delle sezioni elaborate per la costruzione del modello idrogeologico

- Sez 1 Collemezzano- Mazzanta
- Sez 2 Collemezzano- foce Cecina
- Sez 3 Steccaia - foce Cecina
- Sez 4 San Martino - Marina di Cecina
- Sez 5 Poggio delle Tane - Mare
- Sez 6 Colline di Bibbona - La California
- Sez T3a,b,c Trasversali al Fiume Cecina

Fig.2b Interpretazione stratigrafica dei dati delle perforazioni (Alcune sezioni rappresentative: Sez2,Sez4,Sez5)

a)



b)

sotterranee in X, Y e Z; esso incorpora i modelli bi e tri-dimensionali descritti da Trescott (1975), Trescott e Larson (1976), Trescott, Pinder and Larson (1976) e ampiamente utilizzati dall' USGS.

La sua implementazione è focalizzata particolarmente

a garantirne la rapidità di implementazione, la facile modificabilità, e la compatibilità con la stragrande maggioranza dei supporti hardware.

Modflow permette la simulazione sia in regime di flusso stazionario che in regime di flusso transiente con

PERMEABILITA' nulla	
	Argilla grigia o azzurra (Ag1), gialla (Ag2), marrone (Ag3)
PERMEABILITA' da nulla a molto bassa	
	Alternanza di argilla, argilla sabbiosa, sabbia argillosa, cecino, ghiaia argillosa (C). Alternanza di limi organici, argille scure depositi con torba (P) Argilla sabbiosa grigia (Ag51), gialla (Ag52) Intercalazioni di Arenaria e Argilla (ArAg) Sabbia argillosa grigia (Sa1), gialla (Sa2)
	Arenarie, sabbie fini compatte (Tufi) ed Arenaria (ArT) Arenarie grigie (ArG) Arenaria, sabbie fini compatte (Tufi) Conglomerato (ArTCg)
	Sabbie fini da debolmente a mediamente cementate (Tufo bianco, giallo nei logs di perforazione) (T) Calcarei Arenacei (CAr)
PERMEABILITA' da media ad elevata	
	Sabbia grigia (S1), gialla (S2), rossa (S3). Intercalazioni di Conglomerato, Ghiaia, e Sabbia (Cg) Ghiaie, Intercalazioni di Ghiaie e Sabbie (Gh)

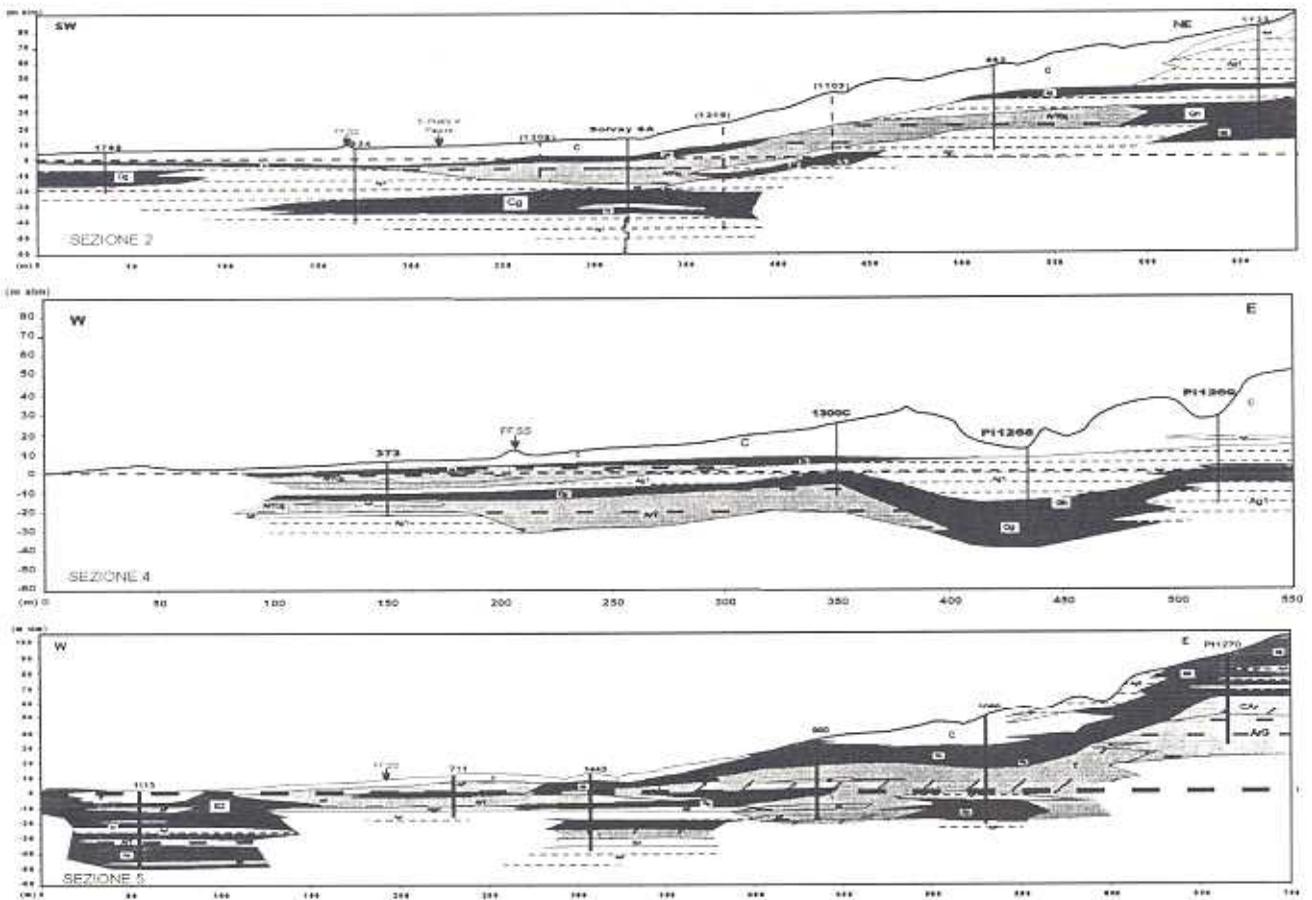


Fig. 3 Caratterizzazione idraulica dei litotipi e sezioni idrogeologiche.

possibilità, in quest'ultimo caso, di variare per periodi definiti sia le condizioni al contorno che entità e distribuzione delle perturbazioni.

In questa breve nota si prenderà in considerazione solo il regime transiente, utilizzato per le simulazioni previsionali elaborate per la piana costiera di Cecina negli anni 1995-1996.

2.1 - Note Matematiche

E' noto che il movimento tridimensionale dell'acqua sotterranea (a densità costante) attraverso un mezzo poroso può essere descritto dall'equazione a derivate parziali:

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

dove:

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} valori della conducibilità idraulica lungo le direzioni x,y,z che sono state assunte parallele agli assi maggiori dell'ellissoide della conduttività idraulica (Lt^{-1});
 h carico idraulico;
 W flusso volumetrico di acqua per unità di

S_s

t

volume dell'acquifero; rappresenta gli apporti o perdite di acqua (t^{-1});
 "storage" specifico del materiale poroso (L^{-1});
 tempo.

L'equazione (1), insieme con le condizioni di carico idraulico al contorno e con le condizioni di carico idraulico iniziali, costituisce la rappresentazione matematica di un sistema di flusso delle acque sotterranee.

Eccetto che per rari casi molto semplici, l'equazione (1) non può essere risolta per via analitica; sono stati perciò sviluppati vari metodi di calcolo che forniscono soluzioni più o meno approssimate.

Un approccio alla soluzione è il metodo delle differenze finite in cui il sistema continuo descritto dall'equazione (1) è 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. Dal processo sopra descritto si deducono sistemi di equazioni algebriche lineari di differenze; la loro soluzione fornisce valori di carico idraulico h agli specifici punti del sistema.

Questi valori rappresentano una approssimazione alla distribuzione, variabile con il tempo, del carico idraulico rispetto a quella che si otterrebbe dalla soluzione analitica dell'equazione (1).

2.2 Discretizzazione

In base a quanto appena definito, nei modelli a differenze finite il "sistema acquifero" viene discretizzato nelle tre direzioni spaziali; ne risulta una suddivisione in righe e colonne sul piano X,Y ed in strati in direzione Z. Nel complesso il sistema in studio viene suddiviso in un numero finito di celle; all'interno di ciascuna cella si situa un punto (nodo) in corrispondenza del quale viene calcolato il carico idraulico.

Tutte le variabili vengono

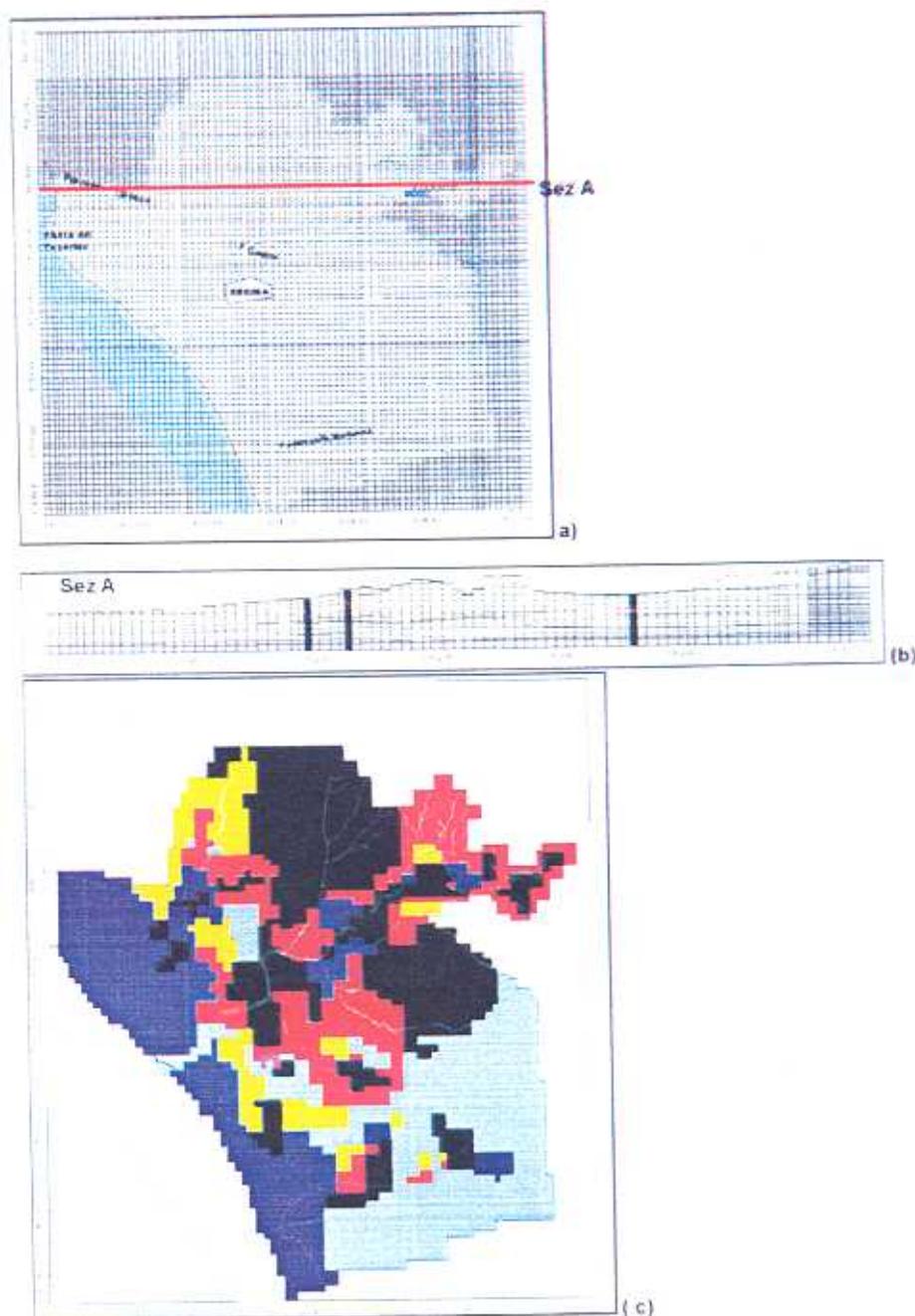


Fig.4a,b,c - Discretizzazione dell'area modellizzata: (a) griglia degli elementi finiti in pianta, (b) in una sezione, (c) distribuzione dei parametri idraulici sul livello 10 (rappresentativo di uno degli acquiferi principali)

discretizzate; anche il tempo di interesse per le simulazioni viene quindi suddiviso in intervalli discreti, o "time step".

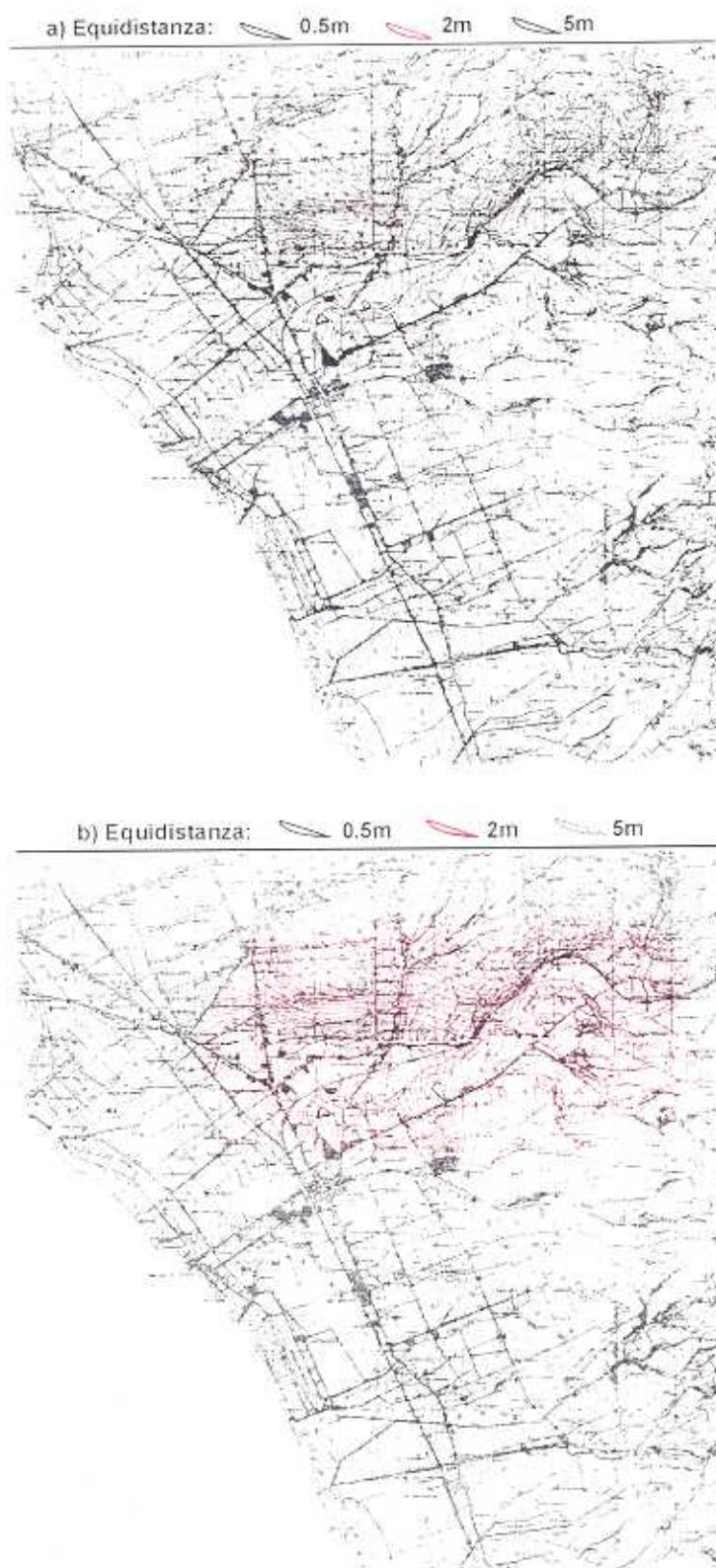


Fig. 5a b) Piezometrie rilevate a) Aprile 1996 b) Settembre 1996

2.3 - Equazione della differenza finita

Lo sviluppo dell'equazione di flusso con il metodo delle differenze finite deriva dall'equazione di continuità: la somma di tutti i flussi in ingresso ed in uscita dalle celle deve essere uguale alla variazione di storage nella cella. Assumendo costante la densità dell'acqua, l'equazione di continuità che esprime il bilancio del flusso per una cella è:

$$\sum Q_i = S_s \Delta h \Delta V \quad (2)$$

dove:

Q_i = Velocità di flusso in una cella ($L^3 T^{-1}$)

$\bar{u}S_s$ = "Storage" specifico; volume di acqua che può essere immagazzinata per variazione unitaria di carico idraulico (L^{-1})

ΔV = Volume di una cella (L^3)

Δh = Variazione di carico idraulico nell'intervallo di tempo Δt .

Il termine a destra dell'equazione (2) è equivalente al volume di acqua immagazzinata in un intervallo di tempo Δt per una data variazione di carico idraulico Δh ; l'equazione (2) viene quindi definita in termini di ingresso e guadagno di "storage".

Flussi esterni all'acquifero, (drenaggi, evapotraspirazione, ricarica ecc) dipendenti dal carico idraulico rappresentano per ogni cella un termine dell'equazione (2).

Per ogni cella si costruisce l'equazione (2) e quindi si risolve il sistema; ad ogni time step il sistema di equazioni viene riformulato partendo dai nuovi valori ottenuti dal time step precedente.

2.4 - Iterazione

Modflow utilizza un metodo numerico iterativo per ottenere la soluzione del sistema di equazioni implementato.

La procedura iterativa si ripete, per ogni time step, producendo ogni volta un nuovo set di valori di carico idraulico (h) che soddisfano con approssimazione crescente il sistema di equazioni.

Quando i valori di h approssimano quelli che soddisfano il sistema, le variazioni fra una iterazione e la successiva diventano molto piccole.

Questo comportamento (convergenza) consente di impostare un "criterio di chiusura" per interrompere l'iterazione.

Anche se "esatte" le soluzioni di un modello sono

sempre approssimazioni all'equazione differenziale di flusso (1); l'accuratezza di questa approssimazione dipende da parecchi fattori, inclusa, ovviamente, la soglia di approssimazione (criterio di chiusura) scelta per arrestare il calcolo iterativo.

2.5 - Tipi di celle e simulazione dei confini

Il sistema di equazioni sopra descritte non viene costruito per tutte le celle.

I sistemi a differenze finite raggruppano le celle escluse dalla computazione in due categorie "celle a carico costante" (il valore di h non varia durante l'intera esecuzione del calcolo) e "celle inattive" (non ricevono né cedono acqua).

Le restanti celle della griglia vengono definite "celle a carico variabile". Per ogni cella a carico variabile si elabora il sistema di equazioni di cui al paragrafo precedente. Celle inattive o a carico costante vengono utilizzate anche per modellizzare i confini del sistema idrogeologico.

2.6 - Discretizzazione verticale

La discretizzazione dello spazio verticale viene ottenuta specificando il numero e lo spessore degli strati da impiegare. Modflow utilizza due differenti tecniche di discretizzazione verticale:

- semplicemente tracciando una serie di piani orizzontali paralleli: ciò conduce ad una rigida sovrapposizione di una griglia tridimensionale ortogonale al sistema geoidrologico (non si tenta di conformare la griglia alle irregolarità stratigrafiche);
- rappresentando acquiferi individuali o zone permeabili in singoli strati del modello: lo spessore degli strati del modello è considerato variabile da punto a punto in modo da simulare la variazione di spessore nelle unità idrogeologiche; questo conduce ovviamente ad una griglia deformata.

Ciascuno dei metodi di implementazione della discretizzazione verticale presenta vantaggi e difficoltà. Le equazioni del modello sono basate sull'assunzione che le proprietà idrauliche sono uniformi in ciascuna cella o che almeno parametri medi possono essere valutati per ogni singola cella; queste condizioni si incontrano quando il modello si adatta esattamente alle unità idrogeologiche.

La massima accuratezza si raggiunge ovviamente quando gli strati del modello corrispondono a specifiche unità idrogeologiche e ciò è più facilmente ottenibile sotto la configurazione del secondo metodo; d'altra parte la griglia deformata non rispetta più esattamente le assunzioni su cui si basa il modello, per esempio che celle dovrebbero avere facce rettangolari, che gli assi

maggiori dell'ellissoide della conducibilità idraulica siano allineati con gli assi del modello ecc.

Poiché ciascuno dei due metodi comporta degli errori, per minimizzarli la discretizzazione verticale viene ottenuta utilizzando una combinazione dei due.

3. Applicazione del modello alla piana costiera tra il Torrente Tripesce ed il fosso della Madonna

Modflow è stato applicato alla piana costiera del Fiume Cecina da poco a monte della soglia idrogeologica della Steccaia fino al mare e dal T. Tripesce al Fosso della Madonna

3.1 - Metodologia

Il lavoro si è svolto in tre fasi parzialmente sovrapposte fra loro:

⇒ **I Fase** Raccolta bibliografica presso Enti pubblici, Ditte Private, Pubbliche Amministrazioni

⇒ **II Fase** Acquisizione diretta di dati.

Al termine delle stagioni di massima e minima piovosità (rispettivamente, dal 15 Aprile al 15 Maggio e dal 2 settembre al 30 settembre 1996). Sono stati effettuati sia il rilievo freaticometrico di dettaglio (pozzi non in emungimento) che il campionamento di acque sotterranee su di una maglia il più possibile regolare di pozzi.

⇒ **III Fase** Elaborazione del modello idrogeologico concettuale ed implementazione del modello numerico.

Dalle oltre 600 pratiche di concessione per la derivazione di acque sotterranee esaminate presso gli archivi del Genio Civile di Pisa e Livorno, e dai dati forniti da Asem e Solvay sono stati selezionati 265 pozzi i cui dati sono risultati utilizzabili ai fini di una ricostruzione stratigrafica e/o per il calcolo di parametri idraulici dell'acquifero. In particolare sono state ricostruite 120 stratigrafie, sufficientemente dettagliate ed univocamente interpretabili, che sono state utilizzate per la schematizzazione idrogeologica dell'area e per la modellizzazione a differenze finite.

Per la definizione dei parametri idraulici si è partiti da quei pozzi, emungenti un singolo livello litologicamente ben identificato, per i quali erano disponibili prove di emungimento; da questi "punti di taratura" sulla base delle correlazioni stratigrafiche e delle capacità specifiche (metodo Civita), i parametri idraulici sono stati distribuiti strato per strato all'intera area

In Fig. 2a sono riportate le tracce delle sezioni lungo le quali è stata effettuata la ricostruzione stratigrafica sulla base delle stratigrafie dei pozzi; la Fig. 2b mostra

alcune sezioni rappresentative mentre in Fig. 3 è riportata la "stratigrafia idraulica" ottenuta combinando dati stratigrafici e dati idraulici. Pressoché per l'intera estensione della piana costiera si è rilevata la presenza di due acquiferi principali, spesso intercomunicanti ma localmente separati da pacchi di argilla di spessore talvolta rilevante.

L'interpretazione idrogeologica elaborata è stata quindi sottoposta a verifica; la verifica ha impiegato la funzione di calibrazione di VModflow che consente di comparare i risultati delle simulazioni con le freatimetrie reali (Fig. 5a e 5b) effettuate su pozzi "spia", valu-

numerica è quello di discretizzare lo spazio fisico indagato nelle tre direzioni X,Y,Z.

- **Discretizzazione orizzontale (X, Y):** la griglia iniziale (70 righe e 70 colonne) è stata nel corso dell'implementazione in-fittita a 77 righe ed 82 colonne. La griglia ottenuta è il risultato di un compromesso fra la necessità di dettaglio topografico nelle aree morfologicamente più accidentate e rapidità di calcolo (Fig. 4a).

- **Discretizzazione verticale (Z):** La necessità di inserire nel modello sia la collina di Collemezzano che le colli-

Proprietà	Litotipo	$K_x = K_y$ (cm/sec)	K_z (cm/sec)	S_s (1m)	S_y (-)	Por (-)
1	MARE	1.0	1.0	1.0e-09	0.99	0.99
2	Argilla-acquicludo	1.0e-08	1.0e-08	0.1	1.0e-03	0.2
3	Livelli a matrice argilloso limosa-acquitardi	5.0e-05	5.0e-06	3.00e-03	0.2	0.25
4	Sabbie limose	1.0e-03	1.0e-03	1.0e-05	0.01	0.1
5	Arenarie,tufi	1.5e-03	2.5e-04	5.0e-05	0.05	0.08
6	Ghiaie sabbiose	0.05	0.05	1.0e-05	0.2	0.25
7 - 8	Ghiaie sciolte	0.15	0.075	1.0e-06	0.3	0.35
9	Sabbie mediamente compatte	5.0e-03	1.0e-03	2.0e-04	0.05	0.1
10	Intercalazioni di conglomerati, ghiaie ed arenarie	6.0e-03	1.5e-03	2.0e-04	5.0e-03	0.01
11	Conglomerati	0.01	1.0e-03	5.0e-04	0.025	0.1
12	Sabbie dunali	0.1	0.1	2.0e-04	0.2	0.3

Tab. 1 - Proprietà attribuite alle celle.

tare statisticamente le differenze e la loro distribuzione e variare di conseguenza le interpolazioni. Si sottolinea che tutte le freatimetrie sono state effettuate su pozzi NON emunti da almeno una settimana e distanti almeno 200 metri da pozzi in emungimento notoriamente continuo e rilevante, quali pozzi industriali e pozzi acquedottistici.

Una volta ultimata la calibrazione sono state eseguite due simulazioni rappresentative della situazione "fine estate" e "fine inverno".

3.2 - Implementazione generale ed input

L'implementazione di un modello consiste nel: definire i limiti del sistema in studio (condizioni al contorno), discretizzare lo spazio di modellazione, definire tutte le variabili interne al sistema idrogeologico (proprietà idrauliche di ciascuna cella, caratteristiche di fiumi, laghi o corpi idrici in generale presenti all'interno dell'area da modellizzare), definire gli stress esterni al sistema (emungimenti, drenaggi, ricariche ecc.), definire gli strumenti (metodi matematici, parametri di calcolo, procedure informatiche) da impiegarsi per calcolare le simulazioni.

Discretizzazione dello spazio

Il primo passo in una modellizzazione idrogeologica

ne di Bibbona ha reso necessaria una discretizzazione verticale piuttosto fitta (minimizzazione dell'effetto gradonatura). Lo spazio verticale è stato suddiviso in 19 strati di cui il primo rappresentativo del suolo e l'ultimo (19°) a simulare il limite inferiore (impervious bedrock) del modello. L'andamento di ciascuno strato è stato ricavato dalle stratigrafie; queste ultime sono state elabora-

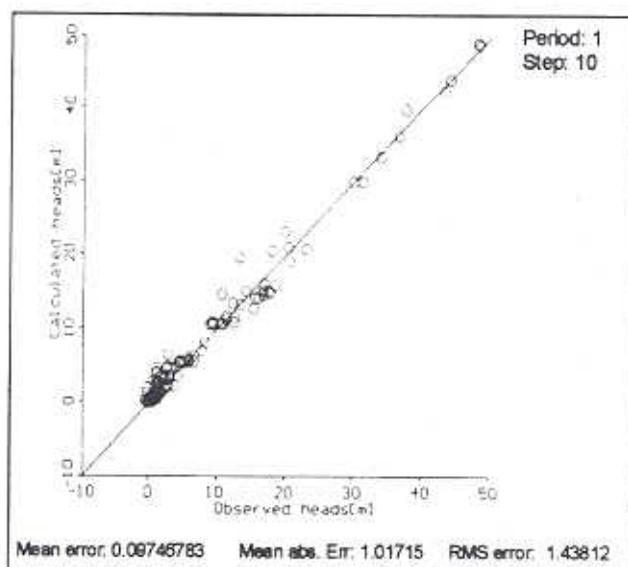


Fig. 6 Diagramma di calibrazione

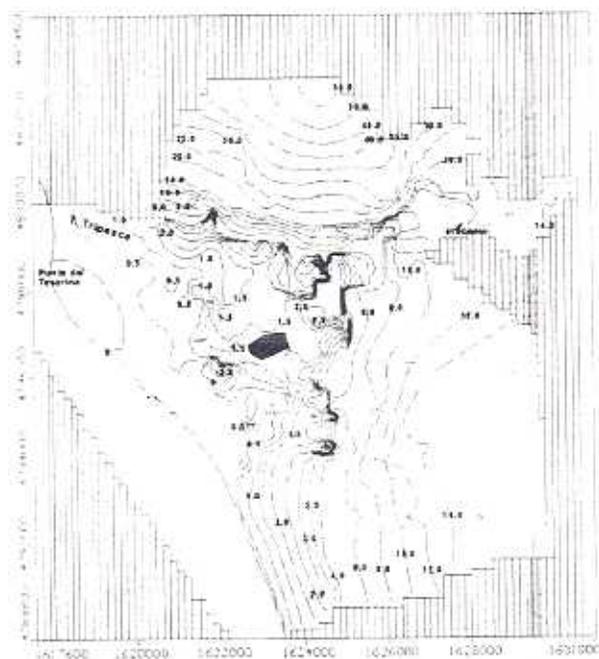


Fig. 7 Simulazione della piezometrica per lo strato 10 alla fine del periodo estivo)

te sinteticamente in successioni di livelli "idraulicamente omogenei" (Fig 4b).

Confini del modello

Sono stati definiti sia utilizzando celle inattive che con celle a carico idraulico costante a rappresentare il mare.

Le celle inattive sono state distribuite in modo da racchiudere l'area di modellizzazione: bassa pianura del

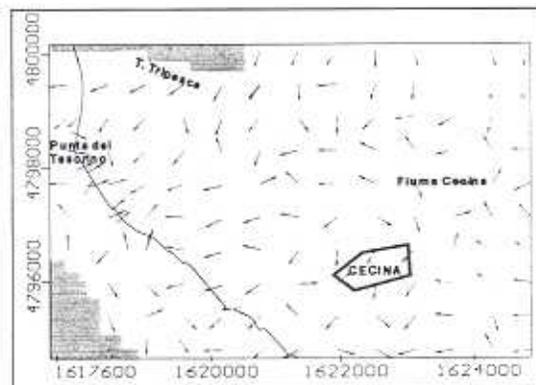


Fig. 8 Direzioni di flusso simulate per l'area Mazzanta-Foce Fiume Cecina

Fiume Cecina dalla Steccaia al mare e dal Torrente Tripesca al Fosso della Madonna.

Fiume

Modflow simula i fiumi come corpi d'acqua separati dal sistema di acque sotterranee da strati di materiali a permeabilità costante, cella per cella.

Per ogni cella del modello rappresentante il fiume sono richieste: l'altezza del pelo libero dell'acqua (H), la quota del fondo del Fiume (H_0) e la Conduttanza (C_f) che rappresenta la resistenza al flusso fra il fiume e l'acquifero.

La modellizzazione del Fiume Cecina è stata uno dei passaggi più critici per l'implementazione del modello; sono infatti disponibili pochi dati sia per il calcolo della

CARTE DELLA CONDUCIBILITA' ELETTRICA SPECIFICA :

Aprile 1996



Settembre 1996



Equidistanza
 200 μ S/cm
 2000 μ S/cm
 10000 μ S/cm

Fig. 9 Carte della conducibilità elettrica specifica rilevata (Area Mazzanta - Foce del F. Cecina).

conduttanza sia per la definizione di H nel periodo estivo ed invernale.

Un tentativo per assegnare alle celle rappresentanti il fiume i parametri sopra indicati è stato quello di ricavare l'altezza H_0 dalla carta topografica 1:10.000 (carta tecnica regionale, di buon dettaglio altimetrico, derivando per fotoreduzione dalla carta 1:5000) ed i valori di C ed H sia dalle dati idraulici ricavati da alcune prove di emungimento su pozzi in alveo, sia dai dati idrometrografici dell'idrometrografo di Ponte di Monterufoli.

I dati così ottenuti sono stati inseriti nel modello e quindi affinati, cella per cella, in fase di calibrazione, fino ad ottenere, per tentativo ed errore, il massimo avvicinamento tra dati reali e risultati simulati.

Proprietà delle celle

Ogni cella del modello non già definita come cella inattiva o cella a carico costante viene caratterizzata da un set di proprietà idrauliche:

- Conduttività (K_x, K_y, K_z): i valori delle conduttività idrauliche (cm²/sec) sono considerati sempre uguali nelle direzioni X,Y mentre è possibile assegnare un valore differente per la direzione Z;
- Coefficiente di immagazzinamento specifico per acquiferi confinati (S_c): per un acquifero saturato è definito come il volume di acqua che l'unità di volume di acquifero rilascia per una variazione unitaria del gradiente idraulico;
- Coefficiente di immagazzinamento specifico per acquiferi non confinati (S_y): volume di acqua che un acquifero non confinato rilascia dall'immagazzinato per unità di superficie per unità di gradiente idraulico;
- Porosità (Por): parametro che controlla, nelle simulazioni, le velocità medie calcolate delle acque sotterranee.

Come precedentemente accennato, lo studio di alcune prove di emungimento nonché l'insieme dei dati idraulici ricavati dalle domande di concessione dei pozzi (capacità specifica, lunghezza e ubicazione del tratto filtrante) ha permesso di calcolare le proprietà sopra indicate per le celle occupate dai pozzi.

Queste proprietà sono state poi estrapolate sull'intera area in base all'interpretazione idrogeologica già elaborata.

La calibrazione ha permesso di verificare ed affinare l'estrapolazione areale. Nella tabella 1 sono riportati i valori delle proprietà assegnate mentre nella Fig. 4c è rappresentata la distribuzione areale finale sullo strato

del modello rappresentativo dell'acquifero più superficiale (Strato 10).

La proprietà 1 attribuita alle celle che rappresentano il mare, celle a carico costante, è stata "costruita" per simulare la capacità di ricezione e cessione idrica illimitata.

Le proprietà da 2 a 12 sono state ricostruite come sopra accennato, per classi di litotipi assunti come idraulicamente omogenei sulla base delle numerosissime, ma talvolta sibilline, descrizioni stratigrafiche disponibili nelle pratiche di concessione del Genio Civile.

Perturbazioni esterne al sistema

L'insieme dei fattori "esterni" in grado di condizionare il comportamento del sistema viene definito come "perturbazioni esterne".

Tra essi: emungimenti, drenaggi, ricariche artificiali. Ricarica meteorica ed evapotraspirazione sono "perturbazioni esterne" sempre presenti.

⇒ Pozzi: in Modflow la modellizzazione degli effetti dei pozzi viene effettuata assumendo il pozzo come ubicato al centro di una cella, filtrato sull'intero spessore dello e sottoposto ad emungimento costante durante ogni time step di modellizzazione. Un pozzo emungente più di uno strato del modello viene rappresentato come un gruppo di pozzi; ciascun pozzo del gruppo "virtuale" viene considerato come filtrato su uno solo degli strati emunti dal pozzo reale multifiltro. Una simile rappresentazione simula molto efficacemente gli effetti dell'emungimento su ciascuno strato.

Non avendo dati certi sulla distribuzione nel tempo degli emungimenti, ai fini delle simulazioni modellistiche sono stati considerati per il periodo estivo in emungimento tutti i pozzi sia irrigui che industriali che idropotabili; per il periodo invernale sono stati considerati inattivi tutti i pozzi irrigui e parte di quelli ad uso idropotabile ed industriale in accordo con i dati forniti da ASA e Solvay.

L'esame della carta delle variazioni piezometriche reali fra campagna primaverile ed autunnale ha permesso di individuare per quali pozzi l'ipotesi iniziale non risultava confermata e quindi correggere l'implementazione. L'entità degli emungimenti è stata ricavata dalle pratiche di concessione dell'Ufficio del Genio Civile di Livorno e dai dati forniti da ASA e Solvay.

⇒ Drenaggi: la funzione drenaggio è stata messa a punto per simulare gli effetti della rimozione di acqua da un acquifero con velocità proporzionale alla differenza di carico idraulico tra l'acquifero e la quota dei dreni; è stata utilizzata per simulare gli effetti della

bonifica meccanica della Mazzanta.

⇒ Ricarica ed evapotraspirazione

Ricarica

Modflow modella una ricarica areale dovuta alle precipitazioni meteoriche. I dati necessari per la modellizzazione sono stati ricavati dai dati pluviometrici dell'Ufficio Idrografico di Pisa. In particolare si è considerata una infiltrazione efficace uniformemente distribuita su tutta l'area di studio pari a 53 mm/anno per il periodo estivo e pari a 180 mm/a per il periodo invernale (coeff. di infiltrazione ricavato da bibliografia IIRG per i litotipi affioranti). La ricarica viene applicata allo strato 1 ed il raggiungimento della tavola d'acqua viene calcolato da Modflow attraverso le proprietà idrauliche delle celle.

Evapotraspirazione

La funzione Evapotraspirazione in Modflow simula l'effetto della traspirazione delle piante e la diretta evaporazione per rimozione di acqua dalle acque sotterranee. L'approccio è basato sulle seguenti assunzioni:

- le perdite per Evapotraspirazione avvengono alla massima intensità (E_v) quando la tavola d'acqua raggiunge una specifica altezza (H_{ET} = Altezza della superficie di Evapotraspirazione), in relazione con la quota topografica delle celle.
- l'evapotraspirazione dalla tavola d'acqua cessa quando l'altezza della tavola d'acqua stessa raggiunge una specifica profondità, dalla superficie topografica (H_{ex} = profondità di estinzione).
- fra i due limiti sopra indicati H_{ET} ed H_{ex} , l'evapotraspirazione varia linearmente con il livello della tavola d'acqua.
- l'evapotraspirazione viene applicata al top dello strato 1.

Come per i dati relativi alla ricarica anche i dati relativi all'evapotraspirazione sono stati ricavati dai dati meteo dell'Ufficio Idrografico:

E_v Estate (giugno, luglio, agosto): 1720mm/a;

E_v Inverno (da settembre a maggio): 520 mm/a; H_{ex} = 1m

Pozzi per la calibrazione

La funzione calibrazione memorizza, per ogni periodo di modellizzazione, i valori di carico idraulico (H_c) calcolati per la cella ove sono ubicati i filtri di ciascun "pozzo di osservazione". Ciò rende possibile paragonare i valori di carico idraulico calcolati con quelli misurati nella realtà (H_o), valutare statisticamente la rispondenza del modello alla realtà, produrre idrogrammi simulati per i pozzi di calibrazione:

Per la modellizzazione in oggetto sono stati inseriti quei pozzi (circa 120), misurati durante le due campagne piezometriche, di cui si conosceva univocamente la profondità del filtro. I dati della campagna piezometrica primaverile sono stati utilizzati per definire la situazione iniziale (Fig 5a); la calibrazione è stata effettuata utilizzando i dati piezometrici rilevati nella campagna autunnale (Fig 5b).

Bilancio a zone

Modflow permette il calcolo di un bilancio idrico per zone utilizzando i dati ottenuti dalla simulazione. Il dato di bilancio zona per zona viene fornito sia in totale che considerando separatamente gli elementi del sistema che contribuiscono agli scambi.

La Fig. 12 mostra le quattro zone distinte nella modellizzazione in oggetto.

Zona 1 Mare .

Zona 2 Area a Nord del Fiume Cecina

Zona 3 Area a Sud del Fiume Cecina

Zona 4 Zona a monte della Steccaia.

Parametri per il calcolo

⇒ Regime transiente: situazione iniziale e discretizzazione del tempo

L'area di piana costiera modellizzata è fortemente antropizzata e caratterizzata da forti emungimenti, variabili in intensità nel corso dell'anno, sia irrigui che industriali che idropotabili; ciò ha imposto l'implementazione del modello e quindi il calcolo delle simulazioni per regime transiente.

Tale modalità infatti permette la modellizzazione di un sistema idrogeologico sottoposto a stress esterni variabili nel tempo in numero ed intensità (sistema non all'equilibrio). È opportuno sottolineare che gli emungimenti reali possono variare frequentemente in periodi brevi. La schematizzazione per cui essi vengono considerati costanti (per un periodo di 90 giorni, periodo estivo, e di 275 giorni, periodo invernale) risulta quindi una sovrasemplificazione, imposta dall'incertezza sull'effettiva distribuzione temporale degli emungimenti. Le simulazioni sono state quindi calcolate per due periodi, uno di 90 giorni e l'altro di 275; per una maggiore accuratezza del calcolo iterativo i due periodi sono stati a loro volta suddivisi in 10 intervalli ciascuno ("Time steps" vedasi paragrafo 2.4).

Il calcolo per regime transiente richiede, oltre alla discretizzazione del tempo, l'implementazione di una situazione di carico idraulico di partenza.

Come situazione iniziale sono stati utilizzati i dati relativi alle misure piezometriche della campagna primaverile.

⇒ Iterazione

Il compito dell'iterazione è già stato descritto nel paragrafo 2.4. Il metodo utilizzato in questo lavoro è denominato SIP "Strongly implicit procedure". Il criterio di convergenza è stato imposto a 0.01 m.

3.3 - Risultati della simulazione

Le simulazioni sono state effettuate per ricostruire la distribuzione del flusso di acque sotterranee a fine estate ed a fine inverno e per verificare (per mezzo della calibrazione) la validità delle interpretazioni idrogeologiche. Visual Modflow fornisce il risultato della simulazione (carico idraulico, o livello piezometrico calcolato) per ogni cella di ogni strato.

Di seguito si illustrano i dati relativi a due strati rappresentativi degli acquiferi principali (Strato 10 e Strato 14) e si riportano le carte ed i dati relativi allo strato rappresentativo dell'acquifero superiore, lo strato 10.

Calibrazione

La Fig. 6 mostra il grafico di correlazione delle piezometrie calcolate con quelle osservate per tutti i pozzi di osservazione dell'area. Il grafico fornisce una indicazione del grado di approssimazione del modello alla realtà. (in caso di corrispondenza esatta tra modello e situazione reale tutti i punti dovrebbero giacere sulla retta a 45°).

L'attendibilità della simulazione è risultata strettamente correlata (com'era d'altronde prevedibile) all'approssimazione dei dati di input, in particolare si nota una proporzionalità inversa dell'attendibilità sia in funzione della complessità morfologica della superficie topografica che della densità degli emungimenti; l'accu-

ratezza del modello può essere definita:

- elevata per le zone a morfologia poco accidentata quali ad esempio le fasce costiere e la sommità di Collemezzano;
- media per zone a morfologia non accidentata ma particolarmente dense in emungimenti o per zone in cui si risente fortemente degli scambi con il fiume Cecina (si ricorda l'assenza di dati quantitativi diretti sugli scambi effettivi fra fiume e falda);
- medio-bassa nelle zone (Collemezzano a quote intermedie) in cui all'errore di interpolazione delle quote, dovuto ad una morfologia piuttosto accidentata, si sovrappone l'incertezza sull'entità e distribuzione temporale degli emungimenti.

La concordanza sostanziale fra piezometrica calcolata ed osservata è comunque tale da permettere, anche senza ulteriori affinamenti (dettaglio morfologico, dati scambi fiume-falda ecc.), la pratica applicazione del modello implementato per l'elaborazione di simulazioni revisionali a vasta scala.

Carico idraulico

Confrontando le superfici piezometriche dei due strati considerati rappresentativi dei due acquiferi, riferite a ciascun periodo di simulazione, si nota che esse differiscono solo in minuti dettagli locali, mentre l'andamento generale appare pressochè identico; questa osservazione conferma che la separazione dei due acquiferi è efficace solo localmente, mentre a scala più vasta il sistema si comporta come un acquifero unico multistrato (la Fig. 7 mostra il risultato della simulazione della piezometrica per lo strato 10 alla fine del periodo1). L'esame della simulazione per lo strato 10 indica un prevalente effetto dreno del fiume rispetto alla falda per il tratto fra la Steccaia e l'abitato di Cecina, effetto che sembra confermato sia dai dati di qualità delle acque nei pozzi profondi di S. Pietro in Palazzi (inquinamento in boro proveniente dalle acque del Cecina solo nei periodi di piena o di morbida del fiume), sia dall'osservazione diretta che il deflusso in alveo, nel tratto immediatamente a valle della soglia della Steccaia (ingresso nella pianura), è assente per la gran parte del periodo estivo ed autunnale e risulta invece sempre ben rilevabile al Ponte della Ferrovia (ultima soglia morfologica in alveo prima del tratto di foce).

Velocità e direzioni di flusso

La direzione di flusso risulta pressochè identica per i due livelli acquiferi nei due periodi di simulazione ed è visibile una generale tendenza dell'alveo del fiume Cecina ad agire prevalentemente come drenaggio. Gli apporti del fiume alla falda parrebbero quindi da ascrivere soltanto ai periodi di morbida e piena.

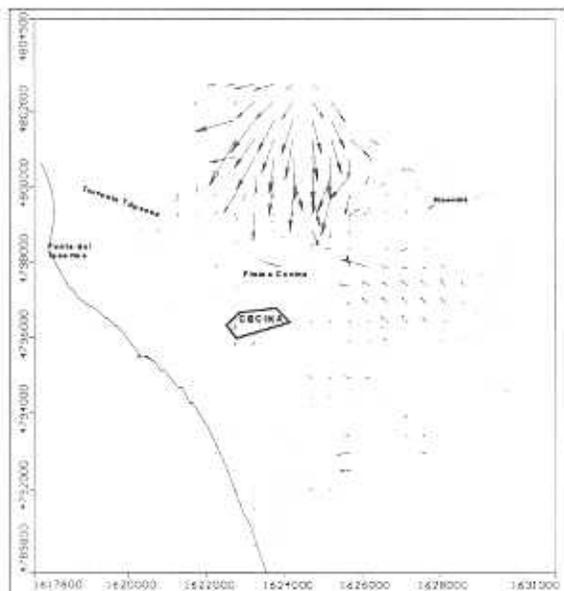


Fig. 10 Simulazione delle velocità di flusso per lo strato 10, periodo estivo

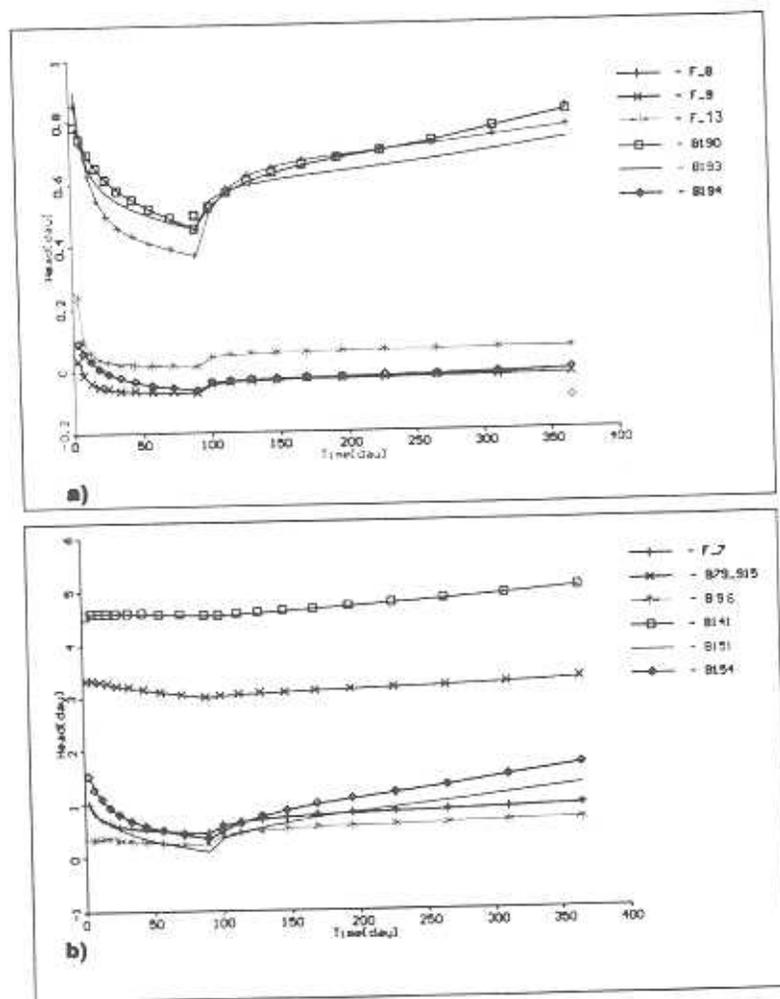


Fig. 11a,b (a) Idrogrammi simulati nei due periodi (estivo ed invernale) di alcuni pozzi rappresentativi della zona Mazzanta-foce F. Cecina.
(b) Idrogrammi simulati nei due periodi (estivo ed invernale) di alcuni pozzi rappresentativi della zona a Sud del Fiume Cecina.

La carta della direzione di flusso nello strato 10, considerato rappresentativo dell'acquifero superficiale, nell'area fra il Fiume Cecina e la Mazzanta (Fig. 8) mostra una evidente ingressione di acque marine verso l'entroterra; ingressione ampiamente confermata dalla carta della conducibilità elettrica specifica (Fig. 9) rilevata per la stessa area.

Per il periodo I in Fig. 10 vengono riportate le velocità di flusso per lo strato 10; la lunghezza delle frecce è proporzionale al modulo del vettore velocità.

Le velocità massime si concentrano, in dipendenza ai marcati gradienti idraulici della zona, nell'area di Collemezzano, e sono prodotte dall'elevata densità di emungimenti rilevanti al piede della collina.

Idrogrammi

Le Fig. 11a e 11b mostrano il grafico dei livelli piezometrici calcolati in funzione del tempo per alcuni pozzi di osservazione situati rispettivamente per la Fig. 11a nella zona di piana costiera fra la Mazzanta ed il Fiume Cecina e per la Fig. 11b a Sud del Fiume Cecina.

Nella Fig. 11a si può notare che a fine inverno i pozzi della piana costiera a Nord del F. Cecina non riacquistano completamente il carico idraulico iniziale cosa che invece avviene per i pozzi della piana costiera situati a Sud; ciò conferma quanto già dedotto con i metodi classici di bilancio idrogeologico, e cioè che la piana costiera compresa tra le foci del Fiume Cecina e del Torrente Tripesce si trova in situazione di deficit di acque sotterranee dolci.

Bilancio

I risultati finali ottenuti dal bilancio idrico sotterraneo per la piana costiera sono riportati in Fig. 12.

Per ciascuna zona e per ciascun periodo di simulazione sono stati calcolati: Variazione dell'immagazzinamento; Immagazzinamento; Emungimenti da pozzi; Drenaggi; Ricarica meteorica; Evapotraspirazione; Scambi con il fiume; Scambi con corpi idrici a livello costante; ottenendo quindi l'entità degli scambi idrici sotterranei di ciascuna zona con le limitrofe.

I dati più significativi si possono così sintetizzare:

- il flusso dal mare verso l'interno (ingressione marina) avviene per oltre il 90% verso la Zona 2 (Zona a Nord del Cecina); ciò è particolarmente evidente nel periodo estivo osservando i flussi tra zona 1 e zona 2;
- la zona 3 tributa verso la zona 2 molto più del viceversa;
- il contributo sotterraneo proveniente dalla porzione alta del bacino alla strettoia a monte della Steccaia risulta decisamente ridotto.

Limiti della modellizzazione

La simulazione sin qui descritta è stata preminentemente finalizzata alla verifica ed affinamento dello schema idrogeologico dell'area di studio e del relativo bilancio idrogeologico; in tale processo sono emersi una serie di problemi e limitazioni che vengono esposte di seguito.

È importante sottolineare che la maggioranza delle difficoltà incontrate sono da ascrivere a carenza di dati, mentre le caratteristiche e le potenzialità di simulazione dell'"utensile Modflow" sono risultate pressoché sistematicamente sovrabbondanti, nonostante la relativa complessità dell'ambiente modellizzato.

⇒ Il rapporto fiume - falda: per modellizzare gli scambi idrici fiume-falda, per ciascuna cella è necessario

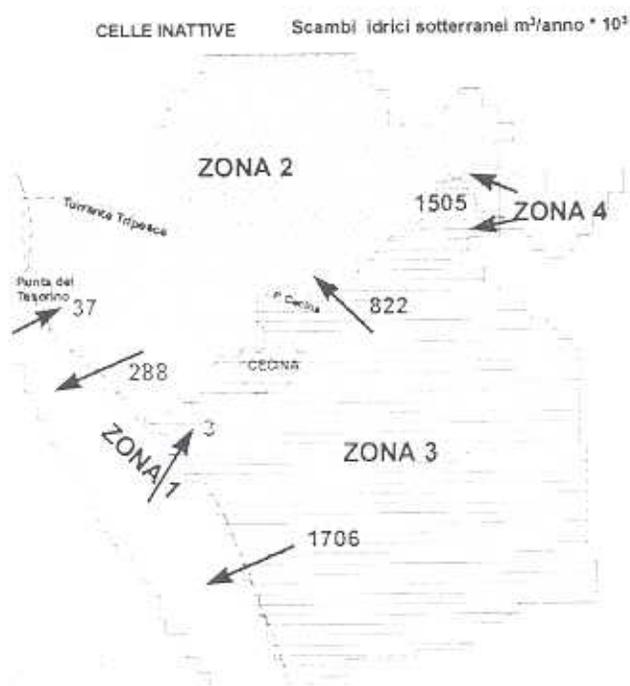


Fig. 12 Bilancio a zone per l'anno 1996. (Scambi idrici sotterranei in $m^3 \cdot 10^3/\text{anno}$)

impostare, per ciascun periodo di simulazione, sia la quota dell'alveo che quella del pelo libero dell'acqua; il primo parametro è stato ricavato dalle carte topografiche con il miglior dettaglio disponibile mentre per il secondo si è dovuto, in assenza di dati certi, ricorrere a correlazioni empiriche tra gli idrometrogrammi di Ponte di Monterufoli ed osservazioni dirette del livello in vari tratti di piana del fiume in vari regimi di portata. Entrambe le scelte, anche se nel caso specifico inevitabili, riducono pesantemente l'accuratezza delle valutazioni dei rapporti fiume-falda.

E' doveroso ricordare inoltre che l'implementazione di un livello medio per un intero periodo di simulazione non consente di modellizzare adeguatamente gli effetti idrogeologici degli eventi di piena; tale inconveniente è ovviabile solamente con una discretizzazione temporale molto fitta, con conseguente proporzionale lievitazione dei tempi di calcolo.

L'esecuzione di una serie di misure di portata istantanea, eseguite su sezioni significative dell'alveo in differenti regimi di portata, in base alle quali calibrare in dettaglio la simulazione per l'intorno del fiume ridurrà non appena disponibile le incertezze relative ai dati di input.

⇒ **Topografia accidentata:** le morfologie particolarmente accidentate (nel caso specifico valli strette ed incise) vengono mediate dalla rappresentazione modellistica introducendo un errore sulle quote in corrispondenza e nell'immediato intorno delle valli stesse.

Per ovviare a tale inconveniente, che porta ad evidenti

discrepanze di calibrazione per i punti di misura lungo le valli, sarebbe necessario un infittimento della griglia X,Y che avrebbe però come conseguenza anche un incremento esponenziale dei tempi di calcolo.

La griglia implementata nel caso specifico rappresenta un compromesso fra accuratezza di calibrazione e scopi della modellizzazione (verifica a vasta scala).

La possibilità di risolvere nel dettaglio l'idrogeologia locale di valli incise o altri marcati accidenti morfologici non viene comunque esclusa, essendo sempre possibile implementare una griglia fitta di dettaglio per le aree di maggior interesse utilizzando come condizioni al contorno, per modelli a piccola scala, l'output delle simulazioni generali.

⇒ **Distribuzione temporale degli emungimenti:** la discretizzazione temporale, per simulazioni di lungo periodo, è mirata prevalentemente ad identificare unità temporali omogenee per quanto riguarda ricarica, evapotraspirazione ed emungimenti.

Nel caso specifico la discretizzazione temporale è stata definita basandosi principalmente sulla rilevante quantità di pozzi irrigui la cui attivazione si restringe in uno spazio temporale ben definito e prevedibile.

Purtroppo le rilevanti utenze industriali ed idropotabili che insistono sull'area non hanno periodi di attivazione e spegnimento altrettanto regolari e preventivamente modellizzabili.

Per simulazioni generali di area ciò non comporta che una piccola discrepanza fra dati misurati ed osservati, purchè le quantità totali di acque emunte siano note.

Ben diverso è il caso di simulazioni preventive di dettaglio mirate allo studio degli effetti e delle problematiche idrogeologiche locali relative all'attivazione di nuovi emungimenti cospicui; per implementare una simulazione accurata si necessita di una discretizzazione temporale molto fitta all'interno della quale sia possibile discriminare periodi di attivazione e spegnimento degli emungimenti più cospicui anche con cadenza inferiore al giorno.

4. Conclusioni

- Il modello implementato si è rivelato uno strumento di rappresentazione e calcolo sufficientemente versatile ed accurato. La verifica dello schema idrogeologico dell'area di studio, elaborato sulla base di dati diretti ed indiretti, è stata effettuata mediante la simulazione dell'evoluzione della situazione dalla fine del periodo invernale alla fine del periodo estivo ed è stata confermata dalla buona correlazione fra dati osservati e calcolati.

- Il modello può, già nell'attuale implementazione, supportare scelte tecniche e decisioni consentendo la verifi-

ca preventiva degli effetti di breve e lungo termine di interventi sul territorio concernenti il prelievo o la immissione di acque nel sottosuolo.

- Mentre per la pianura costiera il modello ha già un grado di accuratezza sufficiente a renderlo utilizzabile per simulazioni preventive, per ottenere simulazioni in grado di prevedere nel dettaglio l'andamento della circolazione idrica sotterranea in zone a morfologia accidentata (colline di Bibbona) e sottoposte ad intenso emungimento (Collemezzano), è necessario (ove si preveda di intervenire) prevedere un affinamento locale.

In dettaglio si osserva:

- la presenza di marcato stress delle falde in una zona di forma grossolanamente triangolare con vertice sul Fiume Cecina poco a valle della Steccaia e base lungo la costa dalla foce del T. Tripesce ad 1 Km a sud di Marina di Cecina;
- la porzione dell'area di stress posta a nord del Fiume Cecina mostra una ingressione salina evidente fino a circa 2 Km dalla costa marcata per tutta l'area di bonifica della Mazzanta per entrambi gli acquiferi principali dell'area;
- il flusso sotterraneo di alimentazione degli acquiferi della piana costiera proviene per la zona a nord del Cecina prevalentemente da Collemezzano con velocità di flusso elevate;
- il flusso sotterraneo di alimentazione degli acquiferi della piana costiera per la zona a Sud proviene dalle colline fra la Steccaia e Bibbona; non si rilevano zone di flusso concentrato e le velocità di flusso risultano moderate ed uniformi;
- è presente un flusso in direzione circa NW-SE che richiamato dagli ingenti emungimenti, sottopassa il Cecina trasferendo le acque sotterranee della zona meridionale prospiciente il fiume stesso verso il piede di Collemezzano;
- l'alveo del Cecina da poco a valle della Steccaia fino all'abitato di Cecina, funge in prevalenza da dreno, contribuendo probabilmente alla ricarica degli acquiferi solo durante i periodi di piena e di morbida.
- la saltuaria ricarica del Fiume Cecina alle falde si sviluppa prevalentemente in destra idrografica, principalmente a causa della depressione della piezometrica indotta in tale zona dai cospicui e diffusi emungimenti;

- dalla comparazione delle simulazioni estive ed invernali (in particolare dallo studio degli idrogrammi calcolati) si nota che la ricarica naturale ripristina i livelli della superficie freatica quasi ovunque nella zona a Sud del Cecina mentre ciò non avviene mai nella zona nord fra il fiume Cecina ed il torrente Tripesce confermando quindi un evidente sovrasfruttamento locale;

- il sovrasfruttamento sta conducendo ad una evidente riduzione della riserva per la concomitanza di tre fattori in ordine di entità decrescente: emungimenti, effetto dreno dell'alveo del fiume ed effetti della bonifica meccanica della Mazzanta.

BIBLIOGRAFIA

- Harbaugh A., 1990* 'A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three dimensional finite-difference ground-water flow model' U.S. Geological Survey Report
- Hill M. C.,* 'Preconditioned conjugate gradient 2 (PCG)', a computer program for solving ground-water flow equations' U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4048
- Hsieh P.A., Freckleton J.R., 1993,* "Documentation of a computer program to simulate horizontal-flow barriers using the U.S. Geological Survey's modular three dimensional finite-difference ground-water flow model" U.S. Geological Survey Open-File Report 92-477
- Leake S.A., Prudic D.E., 1988,* "Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular three dimensional finite-difference ground-water flow model" U.S. Geological Survey Open-File Report 92-477
- McDonald M.G., Harbaugh A.W., Orr B.R., Ackerman D.J.,* "A method of converting No-flow cells to variable-head cells for the U.S. Geological Survey's modular finite-difference ground-water flow model" U.S. Geological Survey Open-File Report 91-536
- Pollock D.W., 1989,* "Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from U.S. Geological Survey's modular three dimensional finite-difference ground-water flow model" U.S. Geological Survey Open-File Report 89-381
- 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.



RONCHI S.r.l.

Trivellazione pozzi
Pompe sommerse
Impianti di sollevamento
Ricerche idriche
Spurghi e controlli
Sondaggi geognostici

Via Goldoni 5/7 Tel. 02-2542076 Fax 02-2549690
20093 COLOGNO MONZESE (MI)