

Collana | Techné



Andrea Romanazzi

# MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA DEGLI ACQUIFERI COSTIERI

Una guida pratica



All Rights reserved

© 2017 Stamen  
[www.stamen.net](http://www.stamen.net)  
Collana: Techné

Cover Design: © Ufficio Grafico Stamen

Volume stampato nel mese di luglio 2017 presso  
Tipografia "Jazz", Viale dei Quattro Venti, 162/b (Roma)

ISBN 9788899871499

## Indice

11	Prefazione
13	1. <i>La risorsa idrica e le sue problematiche</i>
13	1.1 La disponibilità della risorsa idrica
18	1.2 Il degrado qualitativo
21	2. <i>La gestione della risorsa</i>
21	2.1 Utilizzo degli indicatori per una gestione quali-quantitativa delle acque: dal “safe yield” ai modelli numerici
25	3. <i>Il Fenomeno dell’Intrusione marina e i primi modelli predittivi</i>
25	3.1 Il fenomeno dell’intrusione marina
28	3.2 Primi modelli predittivi: Il Modello Ghyben - Herzberg - Glover
32	3.3 La correzione di Hubbert e la soluzione di Fetter
35	4. <i>Modelli numerici idrogeologici per la simulazione del flusso/trasporto</i>
37	4.1 Modelli numerici FDM e FEM
41	5. <i>Il moto dell’acqua sotterranea</i>
41	5.1 Equazione del moto del Flusso
45	5.1.1 La conducibilità idraulica
47	5.2 Moto di filtrazione a densità variabile
48	5.3 Equazioni del trasporto in falda
53	6. <i>La scelta del codice di calcolo</i>
55	6.1 Il codice di calcolo MODFLOW
56	6.1.1 I codici di calcolo MT3DMS, SEAWAT, MODPATH e PEST
58	6.2 Fasi della Modellazione
59	7. <i>Dal Sistema Fisico al modello matematico: la costruzione del Modello Numerico</i>
59	7.1 Modello Concettuale
63	8. <i>Individuazione dell’area di studio e contesto idrogeologico</i>
64	8.1 Discretizzazione dell’area di studio
66	8.2 Studio geologico dell’area ed individuazione dei complessi idrogeologici
68	8.3 Proprietà idrogeologiche e condizioni iniziali
68	8.3.1 Parametri idrogeologici dell’Acquifero
70	8.3.2 Condizioni al contorno
81	8.3.3 Condizioni Iniziali

83	9. <i>Risoluzione del flusso sotterraneo</i>
83	9.1 Scelta del solutore di calcolo e individuazione della soluzione
85	9.2 Calibrazione del Modello
89	9.3 Studio delle direzioni vettoriali delle acque sotterranee – Codice Modpath
93	10. <i>Il Codice Seawat</i>
97	11. <i>Validazione del modello</i>
97	11.1 Implementazione degli scenari di Validazione
103	12. <i>Risultati e confronti</i>
105	13. <i>Applicazione del modello: Previsioni quali-quantitative della risorsa idrica</i>
106	13.1 Cambiamenti climatici nel XXI secolo nel bacino del Mediterraneo
108	13.2 Variazione della concentrazione salina e del livello marino
110	13.3 Input del modello
119	Conclusioni
121	ALLEGATO 1 Scheda pratica di un rapporto finale di implementazione di un modello di flusso e trasporto delle acque sotterranee (ASTM, 1993 e 1995)
125	Bibliografia

L'acqua è l'*arché*, l'elemento primordiale, origine di tutte le cose. L'acqua è il principio di tutte le cose; le piante e gli animali non sono che acqua condensata e in acqua si risolveranno dopo la morte. Tutto è fatto di acqua e tutto fa ritorno all'acqua (Talete di Mileto).





A mia Madre e mio Padre che mi hanno seguito,  
spronato e guidato, a mia Sorella che mi ha indi-  
rizzato, a Maurizio che mi ha insegnato.



## Prefazione

La problematica dello studio degli acquiferi e dell'interazione tra falda acquifera e le infrastrutture di superficie è diventata oggi di vitale importanza ed attualità nell'ambito dell'Ingegneria Idraulica ed Ambientale. Per far fronte al numero elevato di parametri e alla complessità che caratterizza lo studio di un acquifero oggi si fa sempre più ricorso ai modelli numerici. L'uso di modellazioni permette al professionista di integrare tutti gli aspetti presenti nell'area di studio e di testare scenari multipli che possono essere di aiuto nella ricerca di soluzioni progettuali. Oggi sono in commercio moltissimi codici di calcolo, alcuni open source, come MODELMOUSE o PMWIN, che hanno il vantaggio della gratuità ma che spesso sono poco "user friendly", e di proprietà, come ad esempio VISUALMODFLOW, GRONDWATERVISTAS O FEFLOW, che permettono al progettista di trovare facilmente risposte a problemi anche molto complessi. Il ricorso a tali strumenti diventa così indispensabile, ad esempio, per la progettazione di sistemi di bonifica di barriere idrauliche, di sistemi di *pump and treat*, campi pozzi, opere in sotterraneo, interferenze tra pozzi o delimitazione delle aree di protezione, valutazione dell'impatto di contaminanti, valutazione dei processi di attenuazione naturale, e si potrebbe continuare per molte pagine.

Questo saggio, ha lo scopo di fornire gli strumenti teorici e pratici necessari per una modellazione di un acquifero costiero. Dopo una breve parte teorica, necessaria per un corretto approccio alla modellazione, questo lavoro sarà caratterizzato da un taglio fortemente pratico ed applicativo. Seguendo la modellazione di un acquifero costiero carsico particolarmente complesso come quello del Salento, in Puglia, che, a causa delle sue caratteristiche, risulta fortemente vulnerabile a fenomeni di dequalificazione delle proprietà delle acque a causa dell'intrusione marina, verranno mostrati tutti gli *step* necessari per una corretta modellazione numerica. Verranno inoltre descritte le basi teoriche dei codici di calcolo oggi presenti sul mercato in particolare soffermandosi sul codice di calcolo MODFLOW (U.S. Geological Survey), i cui algoritmi sono considerati standard mondiali per la simulazione del flusso negli acquiferi, ma i processi descritti sono adattabili a qualunque altro codice di calcolo.

Il saggio è dunque rivolto a professionisti e consulenti ambientali (Ingegneri, Geologi, Agronomi, Chimici, Biologi ecc.), tecnici di Pubbliche Amministrazioni e società che si occupano della distribuzione idrica, ma

anche ricercatori universitari, studenti e in generale a tutti coloro che hanno intenzione di ampliare le proprie conoscenze in fatto di modellistica idrogeologica.

#### 4.

### MODELLI NUMERICI IDROGEOLOGICI PER LA SIMULAZIONE DEL FLUSSO/TRASPORTO

I modelli sin ora descritti sono definiti *analitici*, ovvero caratterizzati da ipotesi semplificative tali da permettere una risoluzione matematica agevole. Negli ultimi decenni, con lo sviluppo dei computer, sono stati presentati diversi modelli costituiti da una o più equazioni differenziali che descrivono il moto di un fluido attraverso un corpo acquifero. Tali relazioni, spesso molto complesse e non risolubili per via analitica, permettono di descrivere fenomeni naturali e/o artificiali riducendo notevolmente le assunzioni semplificative. Per questo dal 1960, ovvero da quando i computer si sono diffusi, i modelli matematici sono stati soppiantati da quelli numerici. Un modello numerico è una rappresentazione semplificata della realtà consistente in un set di equazioni differenziali che descrivono i diversi meccanismi di scambio di massa, momento ed energia in una forma che garantisca il rispetto dei principi classici di conservazione (Troisi, 1989). Un modello contiene quindi, in principio, tutte le informazioni relative al comportamento fisico del sistema in studio ed è potenzialmente in grado di fornirne una descrizione nella forma più desiderabile (Troisi, 1989).

Per quanto riguarda le possibili “semplificazioni”, esse si traducono normalmente in una riduzione delle dimensioni spaziali del problema (modelli 1D, 2D, 3D), oppure allo studio di soluzioni in regime stazionario, o ancora alla semplificazione delle condizioni al contorno. I primi modelli numerici erano comunque basati sull’ipotesi di una interfaccia netta come quello presentato da Volker e Rushton (Volker & Rushton, 1982), da Mercer et al. (1980), o da Polo e Ramis (Polo & Ramis, 1983). Con lo sviluppo dei computer, è stato però possibile superare le limitazioni riscontrate nella modellazione analitica e risolvere le equazioni di governo nella loro forma generale, ovvero considerando una zona di transizione o di mescolamento delle acque, anche in regime di moto transitorio e con condizioni al contorno complesse.

Oggi i modelli numerici possono essere classificati in molteplici modi. Possono essere suddivisi in funzione delle dimensioni, ovvero in modelli bidimensionali, quasi tridimensionali, nei quali non è esplicitato il confine tra i differenti layers in profondità, e tridimensionali “full”. La scelta del tipo di approccio viene fatta generalmente in base alle conoscenze sulla distribuzione delle fratture e della permeabilità e comunque nel caso di mo-

dellazioni a scala di dettaglio, che dunque simulano il flusso alla scala della frattura (Andersson & Dverstorp, 1987). Di fatto, anche nella Letteratura internazionale, l'applicazione di modelli basati considerando il flusso lungo le fratture si limita in genere a casi semplificati e comunque di modeste dimensioni (McCaffey & Adinolfi, 2003), oppure è riferibile a studi particolarmente specifici e dettagliati, dove però comunque si analizzano le condizioni della circolazione idrica in funzione delle singole discontinuità mentre vengono trascurati gli effetti prodotti dall'insieme delle fratture (Oxtobee & Novakowski, 2003). Tali approcci non sono adatti per simulare processi su grande scala. Per tali esigenze diviene molto diffuso il ricorso ad un approccio definito *partially physical-partially conceptual approach*, più noto come ipotesi del “*equivalent porous media*”, ovvero di un poroso equivalente che ha le stesse caratteristiche di proprietà idrauliche del sistema fratturato nel suo complesso.

Anderson e Woessner (Anderson & Woessner, 1992) suggeriscono l'utilizzo di tale approccio anche nel caso di modellazione di sistemi fratturati. L'ipotesi del poroso medio è infatti considerata in Letteratura il metodo di modellazione più flessibile per la rappresentazione del flusso e del trasporto su aree vaste (Schwarz & Smith, 1988; Smith & Schwarz, 1984) o comunque su scala regionale, come del resto testimoniato da numerosi suoi utilizzi anche in aree caratterizzate da carsismo (Smith & Schwarz, 1984; Schwarz & Smith, 1988; Pulido-Bosch, 1989; Anderson & Woessner, 1992; Dufrense & Drake, 1999; Abbo et al., 2003; Scanlon et al., 2003; Papadopoulou et al., 2005; Martínez-Santos et al., 2005; Romanazzi & Polemio 2013; Romanazzi et al., 2014; Romanazzi et al., 2014). Dal punto di vista del fattore “tempo” i modelli possono essere suddivisi in stazionari o in transitori. I *modelli stazionari* sono rappresentativi delle condizioni stazionarie, ovvero che non mutano nel tempo. I *modelli in transitorio* invece rappresentano l'evoluzione del sistema nel tempo. Infine, in funzione del loro utilizzo i modelli possono essere suddivisi in “generici”, usati per analizzare il flusso in un ipotetico sistema idrogeologico e per la produzione di linee guida per una specifica regione; “interpretativi”, ovvero usati come strumenti per studiare le dinamiche di uno specifico sistema; “predittivi”, usati a scopi previsionali per valutare gli effetti di un'azione o di un evento sul sistema idrogeologico ed in particolare previsioni delle variazioni del sistema al variare delle condizioni di bilancio naturali (precipitazioni, drenaggi-alimentazione fiumi) e antropiche (prelievi, irrigazioni) e/o previsioni dell'effetto di interventi nell'ambito del risanamento ambientale.

#### 4.1 Modelli numerici FDM e FEM

In generale, una macro suddivisione dei codici di calcolo è quella in *modelli alle differenze finite (FDM)* e *modelli agli elementi finiti (FEM)*. L'utilizzo dell'uno o dell'altro metodo dipende dalle scelte del progettista e dal problema da risolvere. Il metodo alle differenze finite (Finite Difference Method o FDM), è basato sul concetto di approssimazione di derivata parziale a differenza (Fig.15), ovvero

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

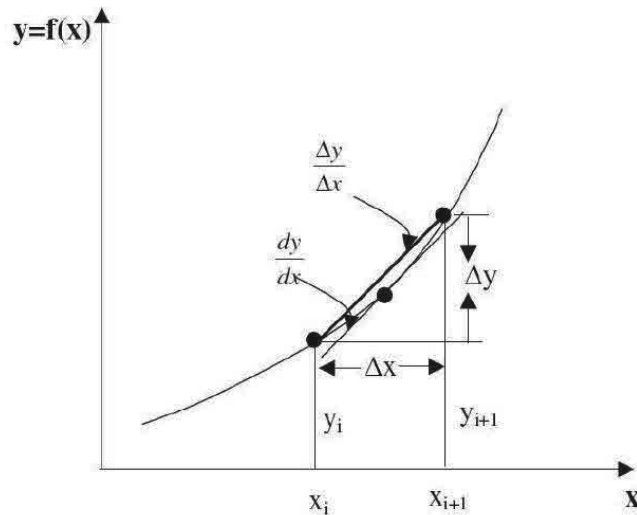


Figura 15 - Concetto di approssimazione matematica alle differenze finite

In generale il FDM discretizza lo spazio e il tempo nel dominio modellato sotto forma di una griglia di celle rettangolari di dimensione variabile o costante. Il centro della cella è detto nodo. Il carico idraulico è espresso dalla differenza tra due nodi contigui. I FEM approssimano invece il dominio in celle che possono avere una geometria variabile, generalmente triangolare, in modo che in ogni elemento il flusso sia fornito in termini di carico idraulico ai nodi della cella. Nella figura 16 sono mostrati i due differenti approcci relativi alla discretizzazione della mesh.

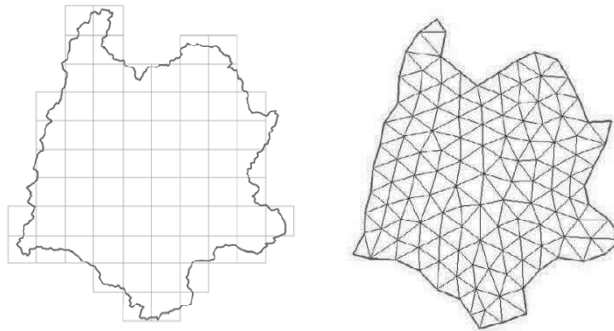


Figura 16 - Confronto della discretizzazione in celle quadrate (FDM) e celle triangolari (FEM) (Moreno & Spitz, 1996)

In generale i FEM vengono definiti modelli a maglie non strutturate, i FDM invece utilizzano, come già detto, griglie strutturate. Infatti in un FDM ogni cella è circondata da ulteriori 6 nelle tre direzioni e dunque risulta un sistema a 7 punti che corrisponde ai sette centri delle celle (Fig.17).

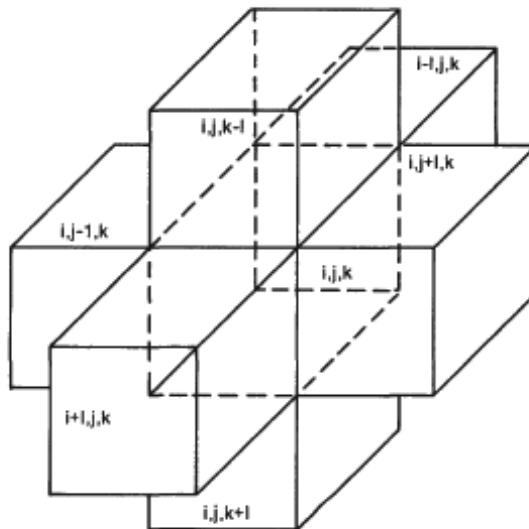


Figura 17 – Sistema strutturato ai FDM (Moreno & Spitz, 1996)



6.

## LA SCELTA DEL CODICE DI CALCOLO

Tutti i modelli numerici idrogeologici, da quelli più semplici ai più complessi, si basano sulla risoluzione del sistema dell'equazioni del moto del flusso e del trasporto.

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial(v_i C)}{\partial x_i} + \frac{q_s}{n} C_s + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( n D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \sum_{n=1}^N R_n = \frac{\partial C}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\delta h}{\delta z} \right) + W = S_s \frac{\delta h}{\delta t} \end{array} \right.$$

La soluzione di queste equazioni consiste nell'individuare la distribuzione della funzione sconosciuta (altezza piezometrica, concentrazione etc..) nello spazio e nel tempo (regime transitorio). Esistono molteplici codici di calcolo utilizzati per la modellazione idrogeologica. Nella Tabella 3 è riportato una summa dell'approccio metodologico per la scelta dei codici di calcolo. Ovviamente ogni codice possiede limitazioni ed incertezze legate alle conoscenze idrogeologiche dell'area, alla definizione del modello concettuale, alla calibrazione e alla simulazione dei risultati.

Nome del Modello	Dimensioni	Caratteristiche	Tempo Richiesto
AQTESOLV	2	Modello semianalitico usato prevalentemente per definire e studiare aree di prelievo o iniezione di acqua nel sottosuolo in acquiferi bidimensionali con l'ipotesi del Poroso Equivalente Medio.	giorni
ATI23D	3	Modello del trasporto del soluto reattivo, radiattivo e termico in falda in un flusso costante, parallelo ed uniforme.	giorni
PLUME3D	3	Modello di trasporto del soluto da fonti puntuali	ore
EPA-WHPA	2	Modello bidimensionale per il trasporto di soluto con codice di calcolo "particle tracking"	giorni
SUTRA	2	Modello bidimensionale per il trasporto che include le ipotesi densità dipendente	giorni
HST3D	3	Modello per il trasporto solido in acquiferi saturi	ore
MODFLOW	quasi-3	Modello alle differenze finite che simula il trasporto nelle tre dimensioni. Può essere implementato con ulteriori codici di calcolo.	ore/giorni

Tab. 3 – Confronto tra differenti codici di calcolo

La risoluzione numerica è una approssimazione dell'equazioni differenziale del flusso

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

dove alle derivate parziali che caratterizzano l'equazione vengono sostituite le più semplici differenze algebriche tra due punti specifici detti nodi che formano la griglia del modello. La discretizzazione della griglia può avvenire attraverso l'utilizzo di due tipologie di celle, ovvero ottenendo una mesh-centered grid o mesh-node grid, a seconda che il valore del carico idraulico sia misurato in un punto centrato nella cella o nei suoi nodi. Anche questa è una scelta del progettista.

#### 6.1.1 I codici di calcolo MT3DMS, SEAWAT, MODPATH e PEST

Al codice di calcolo MODFLOW sono quasi sempre associati ulteriori codici che permettono di implementare allo studio del flusso delle acque sotterranee problematiche più complesse come quelle del trasporto di sostanze/inquinanti, calcolare tempo e percorsi di percorrenza o risolvere problematiche di intrusione marina che affliggono gli acquiferi costieri.

Il codice per la soluzione dell'equazione del trasporto in falda che simula gli effetti della convezione, della dispersione e delle reazioni chimiche tra i soluti disciolti nel flusso è MT3DMS. Viene adoperato ogni qual volta si vogliono valutare tempi e percorsi di sorgenti di contaminazioni puntuali e non puntuali, come plume o infiltrazioni di inquinanti da discariche.

MT3DMS (Zheng & Wang, 1999) simula gli effetti della convezione, della dispersione e delle reazioni chimiche tra i soluti disciolti nel flusso e dunque che risolve l'equazione del trasporto

$$-\frac{\partial(v_i C)}{\partial x_i} + \frac{q_s}{\theta} C_s + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \sum_{n=1}^N R_n = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Il codice è abbinato all'uso del MODFLOW in quanto necessita dei risultati sulle caratteristiche del flusso ottenuti dal quest'ultimo. I risultati del modello, consistenti nelle concentrazioni dei contaminanti per ogni cella  $C(\mathbf{x},t)$ , sono forniti in formato ASCII per cui si prestano ad essere rielaborati da altri programmi. MT3DMS e MODFLOW, però, non tengono conto che, in acquiferi costieri, vi è una differenza di densità che può essere presente all'interno di uno stesso fluido (acqua). In questi casi è necessario co-

### 8.3.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno indicano il rapporto tra il modello e ciò che lo circonda. Sono i “limiti del modello” e dunque la loro scelta è uno degli input principali per la realizzazione dello stesso. I criteri decisionali per selezionare le condizioni al contorno si basano in genere sulla topografia, sulla geologia e sull'idrogeologia dell'area. Possono essere di tipo fisico o fittizi. I limiti fittizi si introducono per limitare un'area di studio quando in prossimità di essa non esistono limiti fisici reali cercando di allontanare fisicamente il limite al contorno dalla zona di studio per ridurre la sua influenza sul campo di moto, soprattutto in presenza di sollecitazioni in regime dinamico (ASTM, 1994a).

Da un punto di vista strettamente modellistico, la definizione delle condizioni al contorno consiste nell'assegnare una particolare assunzione matematica ad ogni cella, ovvero in quei punti o aree dove sono presenti delle “caratteristiche” matematiche ben definibili come pozzi, fiumi, dreni, o anche semplicemente limiti topografici e geologici. A ciascuna di queste celle può essere dunque assegnata una condizione al contorno.

Le condizioni al contorno di tipo “fisico” in generale possono essere classificate in tre gruppi.

- Condizione di pressione o altezza piezometrica assegnata, detta anche condizione del primo ordine o *condizione di Dirichlet*. È una condizione detta anche “forte” proprio perché condiziona molto il modello. Consiste nell'assegnare ad una o ad un gruppo di celle un valore di carico imposto che rimane costante per tutta la simulazione. Queste condizioni normalmente coincidono con superfici di acqua libera, mare, laghi etc... La condizione più comunemente utilizzata è quella di altezza piezometrica assegnata e può essere scritta come  $h(x_b, y_b, z_b, t) = h(t)$  dove  $(x_b, y_b, z_b)$  rappresenta il punto in cui è applicata la condizione al contorno e  $h(t)$  una funzione nota nel tempo.
- Condizione di flusso assegnato, anche nota come condizione del secondo ordine o *condizione di Neumann*. È applicabile quando si ipotizza che sia nota la portata scambiata in determinati punti del dominio, rappresentata dalla componente di flusso perpendicolare ai confini. Può essere matematicamente espressa come  $q(x_b, y_b, z_b, t) = q(t)$  dove  $q(t)$  è la componente del flusso perpendicolare al contorno e una funzione nota nel tempo.

- Condizione di strato semipermeabile o di flusso dipendente dall'altezza piezometrica. Questo tipo di condizione è nota anche come condizione del terzo tipo o *condizione di Cauchy* e può essere impiegata quando avviene uno scambio di portata dal sistema all'esterno, ad esempio nel caso in cui il dominio sotterraneo è in contatto con un corpo idrico ad altezza piezometrica costante  $h_b$ , ma gli scambi tra questo e la falda sono limitati a causa della presenza di materiale a bassa permeabilità tra i due. Dal punto di vista matematico possiamo scriverla come  $q(x_b, y_b, z_b, t) = C_b [h_b(t) - h(x_b, y_b, z_b, t)]$ . È utilizzata spesso per la modellazione del reticolo idrografico superficiale, ovvero, fiumi, dreni o laghi.

Nei modelli, poi, vengono utilizzate anche condizioni di “assenza di flusso” o meglio “no-flow”. Nel caso di studio, per quanto riguarda le celle costiere a confine con il mare è stata imposta una *condizione di Dirichlet* (CHD), ovvero una altezza piezometrica costante sul livello mare pari appunto ad un carico nullo (Fig.31) e celle no-flow lungo lo spartiacque. Ovviamente tali condizioni potrebbero anche essere variabili nel tempo. Per quanto riguarda la profondità dell'acquifero carbonatico, non sapendo precisamente la profondità di un eventuale strato impermeabile di base, si è assunta l'ipotesi di Glover (1964), ovvero si è considerato l'acquifero non confinato alla base e l'acqua marina stagnante.

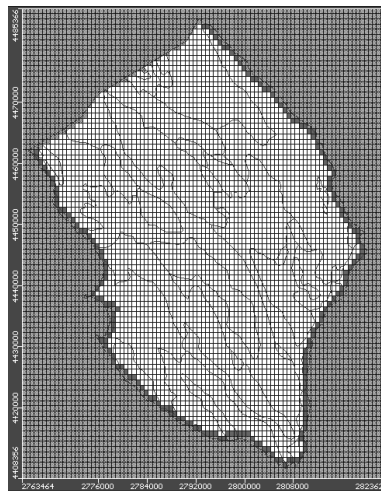


Figura 31 - Rappresentazione bidimensionale dell'area del modello. Le celle costiere, in rosso, sono quelle in cui si è imposta la condizione di Dirichlet

Come detto precedentemente, però, la calibrazione, utilizzando una sola variabile, non è mai unica, da cui diviene importante una analisi della sensibilità del parametro utilizzato. Lo scopo di tale fase è stato quello di valutare come cambia la risposta del modello alle variazioni dovute all'incertezza dei parametri utilizzati. È una sorta di "osservazione" del dato calibrato per ogni parametro. Si individuano così i parametri che influenzano maggiormente il risultato finale, ovvero per i quali bastano modeste variazioni per influenzare fortemente i risultati del modello e dunque il modello viene calibrato in base a tali parametri per minimizzare l'incertezza.

### 9.3 Studio delle direzioni vettoriali delle acque sotterranee – Codice Mopath

Implementato il modello, è spesso utile ricostruire il campo di moto delle acque sotterranee sia per ricostruire il flusso che per validarlo. Il *Particle Tracking Code* è utilizzato per tracciare i flussi e per calcolare il movimento e la velocità di infiltrazione, nonché i tempi di percorrenza, delle acque attraverso l'utilizzo di particelle fittizie. Il metodo è basato sull'assunto che ciascuna componente della velocità ( $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$ ) varia linearmente all'interno di una cella. Sulla base della legge di Darcy, dividendo la portata per la sezione di un flusso è possibile ricavare la portata unitaria avente le dimensioni di una velocità. Questa assunzione permette la definizione di una espressione analitica per descrivere la direzione del flusso all'interno di una cella. In realtà tale espressione non rappresenta la velocità reale delle molecole d'acqua in quanto la sezione generica di un acquifero non è piena ma l'area a disposizione del flusso idrico è minore ed è funzione della porosità efficace  $n_{eff}$ .

Le linee di flusso vengono calcolate attraverso l'espressione

$$d = \frac{v \times \Delta t}{n_{eff}}$$

ove  $v$  è la velocità darciana,  $\Delta t$  la variazione temporale e  $n_{eff}$  la porosità efficace che viene introdotta nel sistema come input. Nota dunque la velocità di filtrazione lungo le facce delle celle e la posizione iniziale, il codice di calcolo calcola le coordinate di ogni altro punto successivo ed il tempo di percorrenza tra due punti lungo una linea di flusso (Fig.43).

Il *Particle Tracking* dovrebbe essere utilizzato di routine per individuare eventuali errori concettuali che non possono essere individuati esaminando semplicemente i carichi idraulici (Andreson & Woesser, 1992).

## CONCLUSIONI

Il duplice obiettivo di questo saggio è stato quello di definire una visione d'insieme delle potenzialità e delle problematiche di modellazione idrogeologica del flusso e del trasporto in falda, con particolare riferimento al fenomeno dell'intrusione e, al contempo, guidare, attraverso consigli ed esempi, il modellista nell'utilizzo di uno strumento fortemente versatile e complesso. Come consigliato anche a livello europeo, la modellazione idrogeologica, anche grazie alla definizione di nuove tecniche di calcolo numerico e allo sviluppo e potenziamento degli strumenti di programmazione, è diventato un indispensabile strumento di progettazione e gestione degli acquiferi ed è un utile strumento per definire un'efficace politica ambientale inerente alla risorsa idrica. A partire da una attenta concettualizzazione idrogeologica dell'area, sono state così illustrate le fasi della realizzazione ed implementazione di un modello numerico tridimensionale del flusso idrico sotterraneo che tiene conto della differente densità tra acqua dolce e salata, in un vasto acquifero carsico costiero, utilizzando come esempio il caso di studio costituito da parte della Penisola Salentina.

L'implementazione e la validazione del modello, oltre che migliorare la conoscenza idrogeologica dell'area di studio, ha permesso di caratterizzare, in termini quali-quantitativi, gli scambi tra falda profonda e il mare, di stimare l'età delle acque sotterranee e il tempo intercorrente tra infiltrazione ed efflusso costiero a mare, e più in generale di definire scenari di gestione previsionali a medio e lungo termine, per valutare a vasta scala l'interrelazione tra corpi idrici sotterranei, le variazioni antropiche e i cambiamenti climatici. Dalle esperienze fatte nel settore appare chiaro come oggi la modellazione idrogeologica diventi necessaria per progettare nuove politiche di controllo degli acquiferi ed aiutare i decision-makers a valutare le eventuali modifiche della disponibilità di acque sotterranee e le dinamiche dell'intrusione marina.