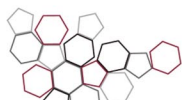




ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



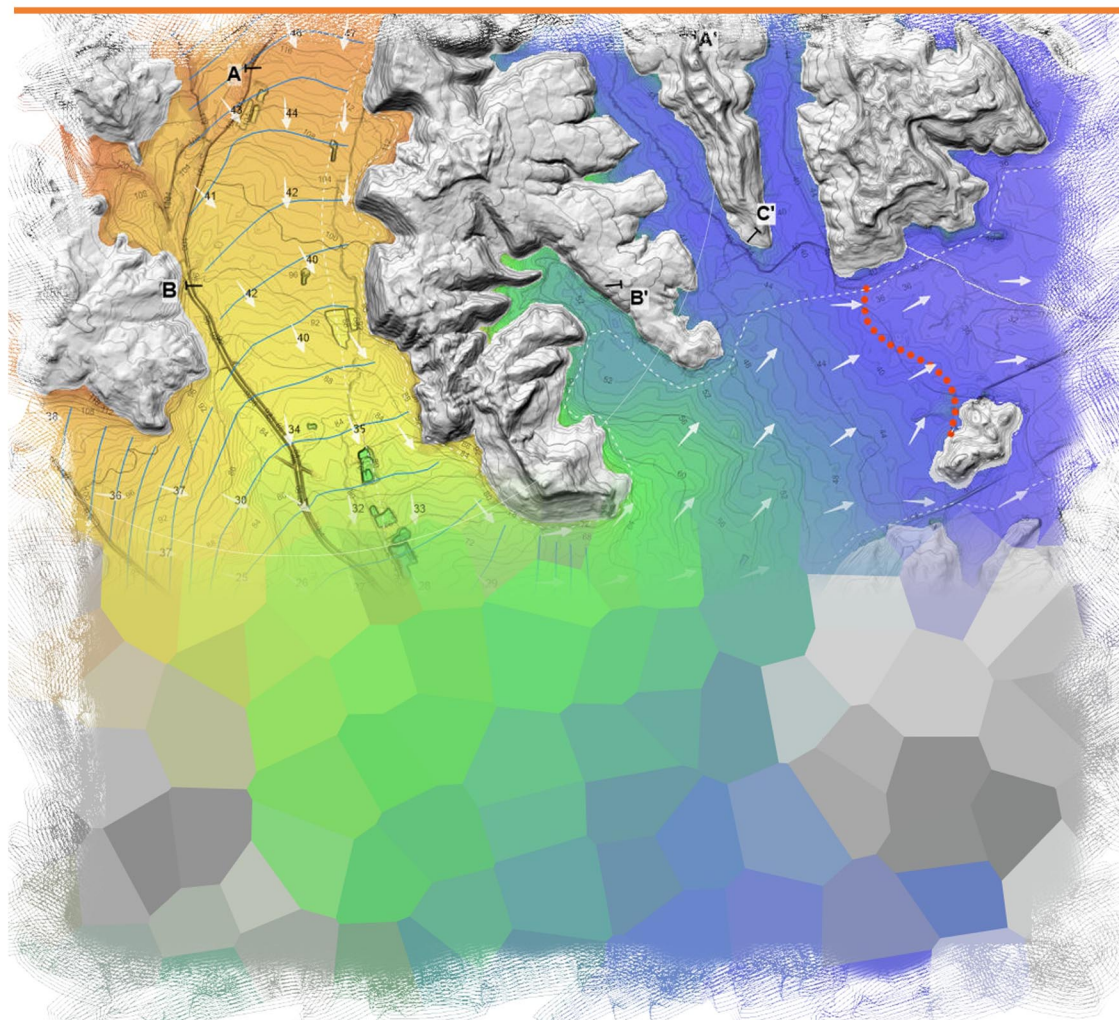
**Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente**



Agenzia Regionale per la Prevenzione
e Protezione Ambientale del Veneto



Sviluppo e valutazione di modelli di flusso in acquiferi porosi





Sviluppo e valutazione di modelli di flusso in acquiferi porosi

Informazioni legali

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), insieme alle 21 Agenzie Regionali (ARPA) e Provinciali (APPA) per la protezione dell'ambiente, a partire dal 14 gennaio 2017 fa parte del Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), istituito con la Legge 28 giugno 2016, n.132.

Le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo manuale.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma

www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Manuali e Linee Guida 193/2021

ISBN 978-88-448-1048-1

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

Grafica di copertina: Elena Porrazzo

ISPRA – Area Comunicazione

Foto di copertina: Massimo Mazzola, Maurizio Guerra

Coordinamento pubblicazione on line:

Daria Mazzella

ISPRA – Area Comunicazione

15 aprile 2021

AUTORI

Emanuele Romano (IRSA-CNR Istituto di Ricerca sulle Acque - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Area della Ricerca di Roma 1, Strada Provinciale 35d, 9 – 00010, Montelibretti-Roma)

Chiara Fiori (ISPRA Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale, Dipartimento Difesa del Suolo/Servizio Geologico d'Italia, Via Vitaliano Brancati 48 – 00144, Roma)

Massimo Mazzola (ARPAV – Arpa Veneto, Dipartimento Provinciale di Vicenza, Servizio Monitoraggio e Valutazioni, via Zamenhof, 353 – 36100, Vicenza)

Elisabetta Preziosi (IRSA-CNR Istituto di Ricerca sulle Acque - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Area della Ricerca di Roma 1, Strada Provinciale 35d, 9 – 00010, Montelibretti - Roma)

Maurizio Guerra (ISPRA Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale, Dipartimento Difesa del Suolo/Servizio Geologico d'Italia, Via Vitaliano Brancati 48 – 00144, Roma)

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano sentitamente la prof.ssa Tullia Bonomi (Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Università degli Studi di Milano Bicocca) e il prof. Mauro Giudici (Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio", Università degli Studi di Milano) per gli utili suggerimenti in fase di revisione del manoscritto.

INDICE

1	INTRODUZIONE	6
2	I MODELLI MATEMATICI IN AMBITO IDROGEOLOGICO	9
3	IMPOSTAZIONE GENERALE DELLO SVILUPPO DI UN MODELLO NUMERICO	19
4	FASE 1 - DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI DEL MODELLO	22
5	FASE 2 - ANALISI DEI DATI DISPONIBILI	25
5.1	Classificazione dei dati	25
5.1.1	<i>Classificazione in funzione della natura dei dati</i>	26
5.1.2	<i>Classificazione in funzione della tipologia dei dati.</i>	27
5.1.3	<i>Classificazione in funzione della modalità di organizzazione dei dati.</i>	27
5.2	Descrizione della qualità dei dati disponibili	27
5.3	Valutazione dell'adeguatezza dei dati ai fini dello sviluppo del modello	28
6	FASE 3 - ELABORAZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DI RIFERIMENTO	32
6.1	Definizione della relazione tra limiti degli acquiferi e area di interesse	33
6.2	Identificazione degli acquiferi, acquitardi e acquicludi	33
6.3	Bilancio idrogeologico	33
6.3.1	<i>Comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera dell'area di interesse</i>	33
6.3.2	<i>Definizione degli scambi idrici tra l'acquifero e il sistema nell'area di interesse</i>	34
6.3.3	<i>Immagazzinamento idrico nell'acquifero</i>	35
6.3.4	<i>Stima del bilancio idrogeologico</i>	35
6.4	Stima dei parametri idrogeologici	38
6.5	Analisi delle mappe piezometriche	39
7	FASE 4 - SCELTA DEL CODICE DI CALCOLO	42
8	FASE 5 - IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO	43
8.1	Definizione del dominio di flusso e relazione del dominio con le condizioni al contorno	43
8.2	Scelta del regime di flusso	43
8.3	Definizione dello schema di discretizzazione spaziale	44
8.3.1	<i>Schema di discretizzazione nel piano (x,y).</i>	44
8.3.2	<i>Schema di discretizzazione lungo la direzione z.</i>	44
8.4	Definizione dello schema di discretizzazione temporale	45
8.5	Assegnazione delle condizioni al contorno	46
8.6	Assegnazione delle condizioni iniziali	60
8.7	Attribuzione dei valori numerici dei parametri idrogeologici	60
8.8	Attribuzione dei valori numerici dei termini di sorgente	60
9	FASE 6 - FASE DI CALCOLO	61
10	FASE 7 - CALIBRAZIONE DEL MODELLO	63
10.1	Scelta dei target	63

10.2	Scelta dei parametri rispetto ai quali effettuare la calibrazione	65
10.3	Assegnazione dei valori numerici dei parametri soggetti a calibrazione	66
10.4	Confronto tra altezze piezometriche osservate e altezze piezometriche simulate	66
10.5	Valutazione della bontà della calibrazione	67
11	FASE 8 - VALIDAZIONE DEL MODELLO	72
12	FASE 9 - ANALISI DI SENSIBILITÀ E UTILIZZO DEL MODELLO COME STRUMENTO PREVISIONALE	78
13	FASE 10 - ELABORAZIONE DELLA RELAZIONE FINALE E CONSEGNA DEL MODELLO	80
14	LA MODELLAZIONE DEL TRASPORTO E IL PARTICLE TRACKING. CENNI	82
15	SCHEDE DI VALUTAZIONE	84
15.1	Scheda di controllo	84
15.2	Fase di lavoro 1: definizione degli obiettivi del modello (capitolo 4)	86
15.3	Fase di lavoro 2: analisi dei dati disponibili (capitolo 5)	87
15.4	Fase di lavoro 3: elaborazione del modello concettuale di riferimento (capitolo 6)	88
15.5	Fase di lavoro 4: scelta del codice di calcolo (capitolo 7)	89
15.6	Fase di lavoro 5: implementazione del modello numerico (capitolo 8)	90
15.7	Fase di lavoro 6: fase di calcolo (capitolo 9)	91
15.8	Fase di lavoro 7: calibrazione del modello (capitolo 10)	92
15.9	Fase di lavoro 8: validazione del modello (capitolo 11)	93
15.10	Fase di lavoro 9: Analisi di sensibilità e utilizzo del modello come strumento previsionale (capitolo 12)	94
15.11	Fase di lavoro 10: elaborazione della relazione finale e consegna del modello (capitolo 13)	95
16	BIBLIOGRAFIA	96

1 INTRODUZIONE

L'implementazione di modelli numerici di flusso e di trasporto dei contaminanti nelle acque sotterranee, soprattutto ai fini della definizione e progettazione degli interventi di messa in sicurezza e bonifica delle acque di falda, ha acquisito con il tempo sempre maggiore importanza nell'ambito dei procedimenti di bonifica dei siti contaminati, disciplinati in Italia dalla parte Quarta – Titolo V del decreto legislativo 152 del 2006. Modelli numerici di flusso e trasporto sono utilizzati anche a scala di bacino o sottobacino per la caratterizzazione e la gestione delle risorse idriche sotterranee.

In tale contesto risulta di primaria importanza che le amministrazioni pubbliche e gli organi di controllo, in qualità di revisori o committenti dei modelli stessi, si dotino di un riferimento metodologico che guidi da un lato l'implementazione, dall'altro la valutazione dei modelli numerici.

Il documento [ISPRA](#) “Presentazione dei dati nell'elaborazione di modelli matematici di flusso” (2013), allegato ai pareri tecnici inerenti la valutazione dei modelli idrogeologici, ben lungi dal costituire una linea guida, aveva l'obiettivo di individuare i contenuti minimi necessari per poter valutare i modelli idrogeologici sviluppati a supporto della progettazione o della verifica degli interventi di bonifica/messa in sicurezza delle acque sotterranee nei siti contaminati.

Un documento redatto con lo scopo di fornire uno strumento operativo e di verifica di modelli numerici di flusso di acque sotterranee è stato sviluppato da IRSA-CNR per ARPA Umbria ([IRSA-CNR, 2006](#)).

A livello internazionale sono state sviluppate da diversi Enti delle “linee-guida” per lo sviluppo di modelli numerici di flusso e di trasporto in acquiferi porosi. Alcuni di essi si pongono l'obiettivo di fornire elementi di “best-practice”, cioè di indicare la sequenza logica di operazioni necessarie affinché i risultati finali della modellazione siano matematicamente corretti e fisicamente rappresentativi e possano quindi essere considerati affidabili rispetto agli obiettivi specifici dichiarati ([Boonstra and de Ridder, 1981](#); [Hill et al. 2000](#); [Murray–Darling Basin Commission, 2001](#); [Willing, 2007](#); [Rassam et al. 2012](#); [Trevor et al. 2016](#)). Altri si pongono l'obiettivo di fornire elementi di valutazione dei modelli stessi a partire da analisi di best-practice ([Reilly e Harbaugh, 2004](#); [Merrick et al. 2002](#); [Middlemis, 2004](#); [Barnett et al. 2012](#); [Wels et al. 2012](#)). Secondo [Reilly e Harbaugh \(2004\)](#) la difficoltà principale che gli organi di controllo e, più in generale, gli utenti finali, si trovano ad affrontare nell'utilizzo o nella valutazione di prodotti di tipo modellistico, è l'analisi oggettiva dei punti di forza e di debolezza dei modelli stessi senza la necessità di riprodurre l'intera analisi. Indipendentemente dall'obiettivo finale e dall'indirizzo generale, tutte le linee-guida citate individuano alcuni elementi imprescindibili, in mancanza dei quali la validità del prodotto modellistico e dunque la sua utilizzabilità operativa sono messi in dubbio.

Alla luce dell'utilizzo sempre più diffuso dello strumento di modellazione numerica nel campo idrogeologico, si è palesata l'opportunità di predisporre un riferimento operativo, sistematico e completo, utile al proponente e all'ente di controllo, anche nell'ottica di convergere verso un sistema di valutazione coerente a scala nazionale della validità di detti strumenti. Tale opportunità si è concretizzata nello sviluppo del presente manuale, specificamente dedicato ai “modelli di flusso in acquiferi porosi”.

Nella stesura del presente documento sono state utilizzate diverse tipologie di fonti:

1. Manuali generali di idrogeologia quantitativa o specificamente di modellistica idrogeologica ([Bear, 1979](#); [De Marsily, 1986](#); [Bear and Verruijt, 1987](#); [Anderson and Woessner, 1992](#); [Zheng and Bennet, 1995](#); [Spitz and Moreno, 1996](#); [Pinder, 2002](#)).
2. Articoli scientifici che trattano temi specifici legati alla modellistica, le cui citazioni vengono riportate nel testo.
3. Note tecniche o Linee guida redatte ed utilizzate in altri paesi ([Boonstra and de Ridder, 1981](#); [Hill, 1998](#); [Hill et al. 2000](#); [Murray-Darling Basin Commission, 2001](#); [Giudici, 2001](#); [Mandle, 2002](#); [Merrick et al. 2002](#); [Pattle Delamore Partners LTD, 2002](#); [Refsgaard, 2002](#); [Middlemis, 2004](#); [Reilly and Harbaugh, 2004](#); [ASTM, 2006](#); [Willing, 2007](#); [Barnett et al. 2012](#); [Rassam et al. 2012](#); [Wels et al. 2012](#); [Sinclair Knight Merz, 2013](#); [ASTM, 2016](#); [Trevor et al. 2016](#); [Alaska Department of Environmental Conservation, 2017](#); [ASTM D5981 / D5981M, 2018](#); [ISO 21365, 2019](#)).

L'analisi di linee guida applicate in altri paesi ha permesso di focalizzare gli obiettivi principali legati all'utilizzo delle stesse. In estrema sintesi essi sono:

1. Fornire uno schema di massima che indichi le fasi di lavoro giudicate imprescindibili per l'implementazione di un modello matematico rappresentativo della realtà idrogeologica in esame.
2. Indicare gli obiettivi e i prodotti relativi ad ogni fase del lavoro, in maniera tale da consentire una verifica (sia in corso d'opera che alla consegna) della completezza del modello.
3. Agevolare lo scambio di informazioni tra tutti i soggetti che a diverso titolo entrano nello sviluppo o nell'utilizzo di un modello matematico.
4. Offrire gli elementi necessari per una corretta impostazione dei modelli, evidenziando gli aspetti critici e suggerendo possibili soluzioni. Da questo punto di vista il presente manuale è rivolto sia al committente (pubblico o privato) con lo scopo di facilitare la verifica *nel merito* del prodotto finale, sia al modellista con lo scopo di guidare la fase di sviluppo.

Il presente documento, elaborato sulla base degli obiettivi elencati, ha come scopo principale di proporre degli *schemi operativi*, elaborati nella forma di “schede di valutazione”, che guidino passo per passo il modellista nel lavoro di sviluppo del modello e il committente nel proprio ruolo di valutatore. Esso può essere utilizzato con diversi obiettivi:

1. Aiutare il modellista nella fase di implementazione del modello evidenziando gli elementi critici e le eventuali lacune esistenti (a livello di dati, elaborazioni, modello concettuale di riferimento, eccetera)
2. Consentire un agevole scambio di informazioni tra committente e modellista, per una verifica puntuale del lavoro sia in corso d'opera che alla consegna
3. Fornire al committente elementi utili per una valutazione critica del lavoro del modellista.

Il documento complessivo mira quindi a fornire gli elementi necessari per un uso efficace delle “schede di valutazione” presentate nel capitolo finale ([capitolo 15](#)) e strutturate come segue.

Una prima scheda (Par. 15.1) riassume obiettivi e prodotti di ogni fase del lavoro: essa può essere utilizzata per una verifica speditiva della completezza del lavoro svolto, senza entrare nel merito della validità del modello.

Le rimanenti schede (da Par. 15.2 a Par. 15.11) possono essere utilizzate sia in fase di sviluppo del modello, per evidenziare gli eventuali punti critici, che in fase di verifica. Una parte delle valutazioni suggerite necessita di competenze specifiche; tuttavia si è cercato di introdurre elementi di valutazione concreti, in genere di carattere matematico e quindi quantificabili, per facilitare una valutazione del prodotto finale basata su criteri oggettivi anche da parte di profili privi di una preparazione di tipo strettamente modellistico.

I singoli elementi menzionati nelle “schede di valutazione” del [capitolo 15](#) sono presentati ed analizzati nel dettaglio nei capitoli dal 2 al 14.

Nel [capitolo 2](#) (*I modelli matematici in ambito idrogeologico*) viene definito cosa è un modello matematico, sia in termini generali che rispetto alle possibili applicazioni in campo idrogeologico. A partire dalle equazioni che descrivono il flusso idrico in un acquifero, vengono introdotti tutti gli elementi che concorrono alla definizione di un modello numerico.

Nel [capitolo 3](#) (*Impostazione generale dello sviluppo di un modello numerico*) sono introdotti tutti i passi necessari per lo sviluppo di un modello numerico di flusso. Si è cercato di fornire, accanto ad indicazioni di carattere generale basate sulle caratteristiche delle equazioni utilizzate, anche suggerimenti di carattere applicativo, al fine di prevenire alcuni fra gli errori più frequenti nella pratica comune. In generale, se alcune delle analisi e delle procedure proposte possono essere modificate in

relazione ai diversi scenari idrogeologici, si ritiene che lo schema generale proposto possa considerarsi valido nella maggior parte delle applicazioni.

Le fasi di lavoro individuate e illustrate nei capitoli seguenti sono così articolate:

- Fase 1. Definizione degli obiettivi del modello ([capitolo 4](#))
- Fase 2. Analisi dei dati disponibili ([capitolo 5](#))
- Fase 3. Elaborazione del modello concettuale di riferimento ([capitolo 6](#))
- Fase 4. Scelta del codice di calcolo ([capitolo 7](#))
- Fase 5. Implementazione del modello numerico ([capitolo 8](#))
- Fase 6. Fase di calcolo ([capitolo 9](#))
- Fase 7. Calibrazione del modello ([capitolo 10](#))
- Fase 8. Validazione del modello ([capitolo 11](#))
- Fase 9. Analisi di sensibilità e utilizzo del modello come strumento previsionale ([capitolo 12](#))
- Fase 10. Elaborazione della relazione finale e consegna del modello ([capitolo 13](#))

Il [capitolo 14](#) è dedicato a fornire alcuni cenni relativi alla modellazione del trasporto in mezzi porosi.

Approfondimenti specifici relativi ad aspetti fisico-matematici o a problematiche legate all'implementazione dei modelli in casi reali o teorici sono discussi in box dedicati, al fine di non appesantire la lettura.

2 I MODELLI MATEMATICI IN AMBITO IDROGEOLOGICO

I modelli possono essere definiti come rappresentazioni matematiche del comportamento fisico di un sistema reale.

Facendo riferimento ad un approccio di tipo deterministico (box 1) un sistema fisico, anche complesso, può essere rappresentato come relazione causa-effetto tra un insieme di fenomeni supposti “causali” (le “forzanti”) rappresentati da variabili indipendenti (o variabili di *input*) e fenomeni che da essi sono determinati, rappresentati da variabili dipendenti (o variabili di *output*). Tale relazione è espressa mediante *equazioni matematiche* nelle quali compaiono, oltre alle variabili di input e di output, i parametri fenomenologici, che nel caso della modellazione del flusso nel mezzo poroso sono costituiti dai parametri idrogeologici, come conducibilità idraulica k e coefficiente di immagazzinamento S .

I fenomeni naturali sono sempre caratterizzati da un elevato grado di complessità che si manifesta nella difficoltà sia dell’identificazione dei processi fisici che concorrono a determinare il fenomeno osservato, sia della descrizione dei fenomeni stessi, cioè nel tentativo di descrivere in termini qualitativi e quantitativi ciò che si osserva. Quando si analizzano i sistemi naturali spesso non è possibile, né utile, descrivere nel dettaglio tutti i fenomeni coinvolti, ma risulta necessario individuare gli elementi che si considerano significativi. Conseguenza di ciò è che non può esistere un modello universalmente adeguato alla descrizione di un sistema, ma la bontà di un modello è valutabile esclusivamente in relazione alla capacità di rappresentare una certa realtà fisica individuata a priori.

In altre parole lo sviluppo di un modello matematico ha come punto di partenza l’individuazione degli obiettivi del modello stesso e, quindi, dei fenomeni che si vogliono rappresentare. Tale rappresentazione consta essenzialmente di tre elementi:

1. le variabili di output considerate rappresentative del fenomeno che si intende modellare: la simulazione dei dati osservati relativi alle variabili di output è l’obiettivo primario di un modello matematico;
2. le variabili di input che si ritiene concorrano al realizzarsi del fenomeno osservato;
3. la relazione, espressa mediante equazioni matematiche attraverso un modello di calcolo, che lega le variabili di input con le variabili di output attraverso i parametri idrogeologici.

I modelli numerici di tipo idrogeologico possono essere inquadrati in questo schema (Figura 1).

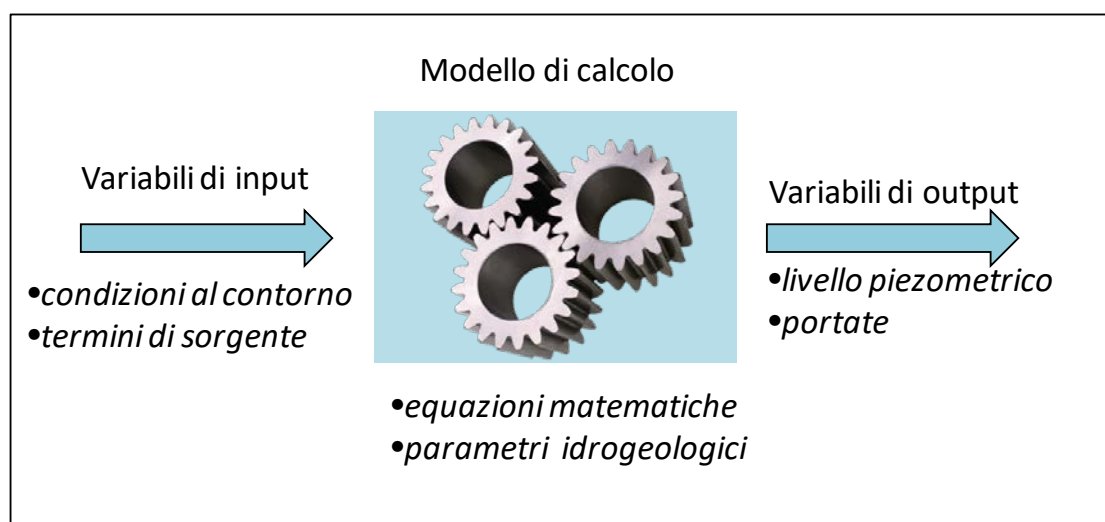


Figura 1. Schema di un modello matematico con riferimento all’ambito idrogeologico

L’obiettivo generale di un *modello di flusso* è la rappresentazione quantitativa del comportamento idraulico di un acquifero.

Nel seguito faremo sempre riferimento a modelli numerici di tipo deterministico (box 1) che descrivono il flusso idrico in un mezzo poroso saturo (box 2). Di conseguenza nel presente documento, non vengono trattati modelli di tipo stocastico, né viene considerato il flusso nella porzione non satura dei terreni che pure ha un ruolo determinante nella ricarica degli acquiferi e nel trasporto di contaminanti.

Box 1 - Modelli deterministici e modelli stocastici

In un approccio di tipo *deterministico* si presuppone che una volta definiti gli elementi di input, i parametri e le relazioni fisico-matematiche che descrivono il fenomeno in esame, il risultato sia univocamente determinato.

In un approccio di tipo *stocastico* tutte le grandezze sono definite in termini probabilistici (ad ognuna di esse non viene assegnato un valore ma una distribuzione di probabilità) ed i risultati sono calcolati in termini probabilistici. I software maggiormente utilizzati per la modellazione in campo idrogeologico adottano un approccio di tipo deterministico.

Box 2 - Modelli di flusso e modelli di trasporto

In campo idrogeologico possiamo distinguere tra modelli di flusso e modelli di trasporto. Nel primo caso viene modellato esclusivamente il campo di moto dell'acqua che circola nell'acquifero; nel secondo caso viene modellato anche il flusso di sostanze presenti in falda, non necessariamente solidali con la fase liquida.

I fenomeni di trasporto (capitolo 14), sia nella zona satura che nella zona insatura, sono regolati da diversi meccanismi distinti: trasporto advettivo, trasporto diffusivo, trasporto dispersivo, adsorbimento, reazioni chimiche, decadimento radioattivo, interazioni tra fasi diverse, cambiamenti di stato, eccetera. Il trasporto advettivo, che considera il moto delle sostanze in esame solidale con la fase liquida (acqua), è governato dal gradiente idraulico ed è descritto dal campo di velocità associato al flusso idrico; in molte situazioni esso costituisce il meccanismo principale di migrazione di sostanze nell'acquifero. È evidente, dunque, che lo sviluppo di un modello di trasporto presuppone necessariamente lo sviluppo di un modello di flusso.

Al fine di una corretta impostazione di un modello idrogeologico è necessario comprendere la natura fisica delle equazioni matematiche che descrivono il flusso idrico all'interno di un acquifero. Per tale motivo nel presente capitolo verranno richiamati alcuni elementi di idrogeologia quantitativa con lo scopo di introdurre nel contesto più adatto gli elementi utili per un corretto approccio alla modellazione numerica; per una trattazione completa si rimanda alla abbondante letteratura sull'argomento, fra cui: Bear, 1979; Bear and Verruijt, 1987; de Marsily, 1986; Anderson and Woessner, 1992; Spitz and Moreno, 1996; Pinder, 2002.

Il flusso idrico in un acquifero poroso è descritto dall'*equazione di flusso*, che riportiamo qui di seguito nel caso di flusso idrico tridimensionale, in condizioni transitorie, regolato dalla legge di Darcy (box 3) in un mezzo anisotropo con gli assi principali diretti lungo le tre coordinate cartesiane.

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

dove: $h = h(x, y, z, t)$ è il potenziale idraulico, rappresentato dall'altezza freatica o piezometrica $[L]$, nel punto (x, y, z) al tempo t . Il potenziale idraulico è somma del potenziale gravitazionale e del potenziale di pressione (il potenziale cinetico è di solito trascurabile) ed è definito come $h = z + p/(\rho \cdot g)$, dove p è la pressione dell'acqua $[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$, ρ la sua densità $[M \cdot L^{-3}]$ e g l'accelerazione di gravità $[L \cdot T^{-2}]$.

$k_x(x, y, z)$, $k_y(x, y, z)$ e $k_z(x, y, z)$ sono le conducibilità idrauliche nella direzione degli assi principali di anisotropia nel punto (x, y, z) [$L \cdot T^{-1}$].

$S_0(x, y, z)$ è il coefficiente di immagazzinamento specifico, definito come la quantità di acqua immagazzinata nell'acquifero (o rilasciata da esso) per unità di volume di mezzo poroso e per unità di variazione del potenziale idraulico nel punto (x, y, z) [L^{-1}]. I parametri k e S_0 sono anche detti *parametri idrogeologici*.

$Q = Q(x, y, z, t)$ rappresenta il termine di sorgente, cioè la quantità di acqua estratta o immessa nell'acquifero per unità di tempo e per unità di volume nel punto (x, y, z) ubicato all'interno del dominio di flusso al tempo t [T^{-1}]. Essa può rappresentare qualsiasi termine di scambio tra l'acquifero e il sistema esterno: scambio con corpi idrici superficiali, portate erogate da sorgenti, ricarica dal piano campagna, disperdenza da setti semipermeabili, emungimenti da pozzi, eccetera.

L'equazione (1) può essere semplificata nel caso di acquiferi per i quali la componente verticale del flusso possa essere trascurata (box 4).

Risolvere l'equazione di flusso (1) rispetto alla variabile h permette di calcolare l'evoluzione temporale del potenziale idraulico, cioè il valore dell'altezza piezometrica in ogni punto (x, y, z) , ad ogni istante t (box 5)

Box 3. Equazione di Darcy e range di validità dell'equazione di flusso

L'equazione di flusso (1) è derivata dall'equazione di continuità (che formalizza matematicamente il principio di conservazione della massa) e dalla legge di Darcy, supponendo trascurabili gli effetti di variazione della densità dell'acqua. La prima ha validità generale, mentre la seconda è valida solamente nel caso di flusso laminare. I limiti di validità dell'equazione di flusso coincidono dunque con i limiti di validità della legge di Darcy.

La legge di Darcy esprime una relazione di tipo lineare tra la portata (eventualmente espressa per unità di area) e il gradiente idraulico. In particolare, in condizioni stazionarie ed in assenza di termini di sorgente, essa può essere scritta come segue:

$$q_i = -k_i \cdot (\nabla h)_i \quad (2)$$

dove: q_i è la portata per unità di area che fluisce nella direzione i -esima [$L \cdot T^{-1}$]

h è il potenziale idraulico (altezza freatica o piezometrica) [L]

$(\nabla h)_i$ è la componente lungo la direzione i del gradiente del potenziale idraulico [-]

k_i è la conducibilità idraulica nella direzione i [$L \cdot T^{-1}$]

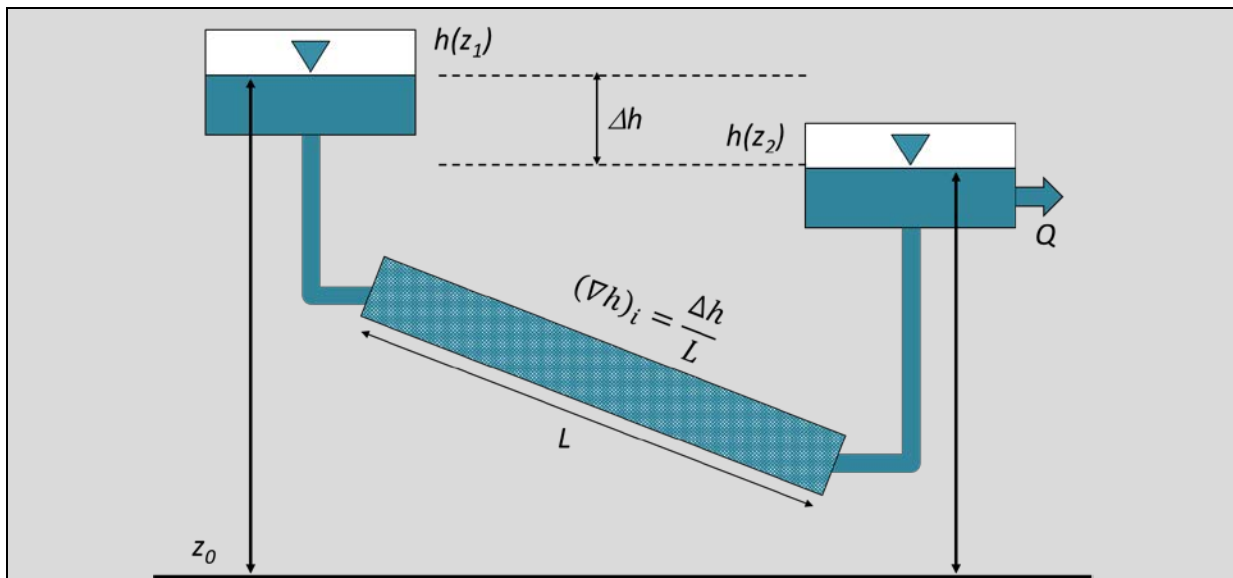


Figura 2. La legge di Darcy relaziona la portata in uscita da un tubo riempito di un materiale granulare isotropo (q_i) con la conducibilità idraulica (k_i) e il potenziale idraulico Δh .

L'equazione di Darcy è valida solo per valori di $(\nabla h)_i$ "non troppo elevati", come verrà specificato meglio nel seguito.

La distinzione tra comportamento idraulico di tipo darciano e comportamento non darciano viene solitamente fatta sulla base del numero di Reynolds (Re), definito dalla seguente relazione:

$$Re = \frac{q \cdot d}{\nu} \quad (3)$$

dove: q è la portata specifica [$L \cdot T^{-1}$]

d è la lunghezza rappresentativa dei vuoti all'interno del mezzo poroso [L]. Tale lunghezza è indicativamente pari alla distanza media tra i granuli, nel caso di sedimenti sciolti, oppure pari all'apertura media delle fratture nel caso di acquiferi fratturati.

ν è il coefficiente di viscosità cinematica [$L^2 \cdot T^{-1}$]

Evidenze sperimentali indicano che un acquifero presenta un comportamento idraulico di tipo darciano se il numero di Reynolds è inferiore a 10 (Bear, 1979; de Marsily, 1986).

Da un punto di vista pratico, il problema della verifica del range di validità della legge di Darcy è strettamente connesso con i valori del gradiente idraulico medio e della conducibilità del mezzo in esame.

Si consideri ad esempio un acquifero alluvionale caratterizzato da una conducibilità idraulica pari a 10^{-3} m/s e un gradiente pari a 10^{-3} . Supponendo un mezzo omogeneo costituito da sabbie caratterizzate da un diametro medio pari a 1 mm, il numero di Reynolds risulta pari a:

$$Re = \frac{10^{-3} \text{ m/s} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \text{ m}}{10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 1 \text{ (flusso laminare)} \quad (4)$$

dove $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ è il coefficiente di viscosità cinematica dell'acqua alla temperatura di 20° C.

All'aumentare della portata specifica e/o della lunghezza caratteristica d , il flusso passa da laminare a

turbolento, uscendo dai limiti di validità della legge di Darcy, come rappresentato in [Figura 3](#).

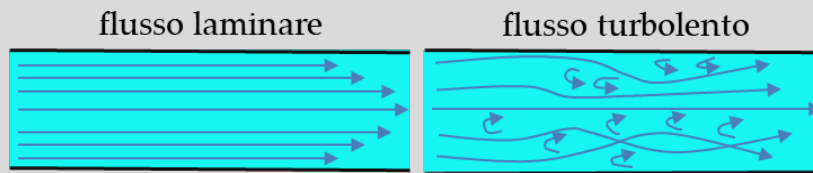


Figura 3. Rappresentazione grafica di flusso laminare e flusso turbolento

In acquiferi porosi o fratturati la legge di Darcy è generalmente verificata; nel caso di sistemi carsici, nei cui condotti la distanza caratteristica d , la conducibilità idraulica k e il gradiente idraulico possono essere maggiori rispetto ad un mezzo poroso, la condizione di flusso laminare può non essere verificata. In tal caso non è possibile utilizzare né la legge di Darcy, né l'equazione di flusso ([De Marsily, 1986](#)). Nel [box 6](#) si farà qualche cenno alla modellazione del flusso in acquiferi fratturati.

Box 4 - Equazioni di flusso nel caso di flusso bidimensionale

L'equazione di flusso (1) viene utilizzata per lo studio del flusso idrico quando le componenti verticali del flusso non sono trascurabili. Questo accade normalmente vicino ai filtri dei pozzi, vicino alle condizioni al contorno o in presenza di discontinuità non stratificata della conducibilità idraulica. Queste condizioni possono avere importanti effetti sul trasporto di contaminanti a larga scala, solo parzialmente quantificabili attraverso il processo di dispersione idrodinamica. Nello studio del flusso idrico in un acquifero regionale, ovvero con estensioni tipiche superiori a qualche chilometro e spessori al più di poche centinaia di metri, ad esempio, per analisi del bilancio idrico a scala di bacino, è utile l'approssimazione di flusso bidimensionale, nel piano x-y, tramite il cosiddetto approccio idraulico per un acquifero confinato e l'approssimazione di Dupuit-Forcheimer per un acquifero freatico. Quando si introducono queste approssimazioni, il contributo dato al termine di sorgente Q dalla disperdenza dell'acquifero, attraverso l'aquitardo che lo separa da altri acquiferi, è spesso calcolato supponendo che il flusso attraverso l'aquitardo sia verticale e in condizioni stazionarie e dipenda quindi dalla differenza di altezza idraulica tra i due acquiferi in corrispondenza delle medesime coordinate (x,y) nel piano. L'equazione di flusso (1) può essere in tal caso semplificata come segue:

Flusso bidimensionale in condizioni transitorie. La (1) si riduce a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (5)$$

dove : h è il potenziale idraulico, rappresentato dall'altezza piezometrica [L]

T_x e T_y sono le trasmissività idrauliche nelle direzioni x e y [$L^2 \cdot T^{-1}$]: $T_x = \int_{z_b}^{z_t} K_x(x, y, z) dz$ e

$T_y = \int_{z_b}^{z_t} K_y(x, y, z) dz$, con $z_b(x, y)$ e $z_t(x, y)$ le quote della base e del tetto dell'acquifero¹

Q è il termine di sorgente per unità di area [$L \cdot T^{-1}$]

S è il coefficiente di immagazzinamento specifico [-]: $S = \int_{z_b}^{z_t} S_0(x, y, z) \cdot dz$ per un acquifero confinato, mentre S coincide con la porosità efficace dell'acquifero non confinato .

Flusso bidimensionale in condizioni stazionarie. Se l'acquifero si trova in una condizione di equilibrio

¹ Occorre sottolineare che nel caso di un acquifero freatico il tetto dell'acquifero coincide con la quota della superficie freatica, cioè in quella fattispecie $z_t(x, y, t) = h(x, y, t)$, quindi la trasmissività dipende dall'altezza idraulica e l'equazione è non lineare.

dinamico, caratterizzata dal fatto che non variano nel tempo le variabili forzanti e di conseguenza non variano nel tempo le altezze piezometriche, l'equazione (5) si riduce a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q \quad (6)$$

Il campo piezometrico soluzione dell'equazione (6) è il campo cui perviene asintoticamente il sistema per tempi infiniti, se non variano le condizioni al contorno e il termine Q . In altre parole, la soluzione della (5) coincide con la soluzione della (6) per $t \rightarrow \infty$

Box 5 - Soluzione dell'equazione di flusso

In generale l'equazione di flusso (1) può avere soluzione se sono noti:

Il dominio di flusso D , cioè la porzione di spazio all'interno della quale si vuole calcolare la piezometria, delimitata da una frontiera ∂D .

Il dominio temporale P , cioè l'intervallo di tempo per il quale si vuole calcolare l'evoluzione della piezometria.

Il termine di sorgente Q ad ogni istante t in ogni punto (x, y, z) del dominio. Nella stima del termine di sorgente occorre tenere in considerazione tutti quegli elementi che rappresentano portate immesse nell'acquifero o estratte da esso: ricarica dal piano campagna, emungimenti, evapotraspirazione, portata erogata dalle sorgenti, interazione con corpi idrici superficiali, eccetera.

Le condizioni al contorno in ogni punto della frontiera ad ogni istante t . Come verrà meglio precisato nel seguito, esse possono essere rappresentate o dal valore dell'altezza piezometrica (condizioni al contorno di Dirichlet o del I tipo 8.5) o dal valore della portata entrante/uscente attraverso la frontiera, definita direttamente attraverso la componente del gradiente idraulico in direzione normale a ∂D (condizione al contorno di Neumann o del II tipo 8.5) o attraverso una relazione con l'altezza idraulica (condizione al contorno di Cauchy o del III tipo 8.5).

Le condizioni iniziali, cioè l'altezza idraulica in ogni punto (x, y, z) all'istante iniziale.

I parametri idrogeologici k e S_0 in ogni punto (x, y, z) del dominio.

Si sottolinea il fatto che l'equazione (1) non sempre è adeguata per descrivere il flusso idrico in un acquifero. Menzioniamo nel seguito due specifiche situazioni idrogeologiche nelle quali l'equazione (1) potrebbe non essere rappresentativa del flusso:

- nel caso di acquiferi fratturati e/o carsici, le velocità di flusso in gioco possono essere superiori ai limiti di validità della legge di Darcy. Alcuni elementi relativi alla modellazione del flusso in acquiferi fratturati sono riportati nel [box 6](#);
- in alcuni casi non è possibile trascurare la variabilità nel tempo e nello spazio della densità del fluido analizzato. In particolare, nel caso di acquiferi costieri, la cui condizione al contorno di valle è costituita dal livello del mare, la differenza di densità tra acque dolci e acque salate deve essere presa in considerazione utilizzando una formulazione più generale dell'equazione di flusso ([box 14](#)).

Box 6. La modellazione del flusso in acquiferi fratturati

Come descritto nel [box 3](#), la condizione di flusso laminare alla base dell'equazione di Darcy e quindi dell'equazione di flusso (1), non sempre è soddisfatta. In particolare nel caso di acquiferi fratturati e/o carsici, le velocità in gioco (locali e/o medie su tutto l'acquifero) possono essere ben superiori ai limiti di validità della legge di Darcy. Ciò implica che non sempre è possibile modellare il flusso idrico in un acquifero mediante la (1).

Si consideri, ad esempio, la schematizzazione di un sistema carsico presentata in [Figura 4](#).

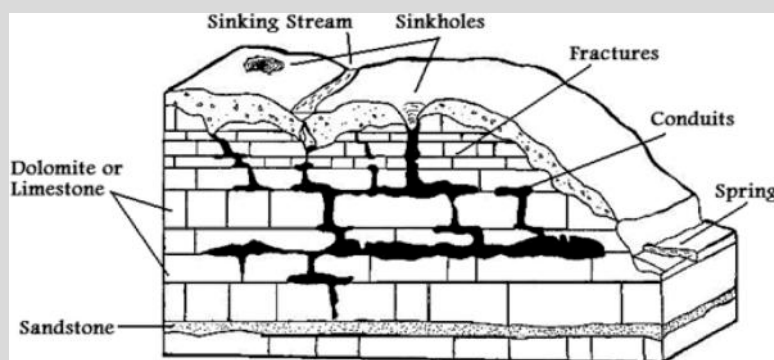


Figura 4. Schematizzazione di un sistema acquifero carsico (da [Ghasemizadeh et al. 2012](#))

Nell'esempio di [Figura 4](#), il sistema delle condotte carsiche occupa una parte trascurabile dell'intero sistema in termini di porosità complessiva dell'acquifero, ma ha un impatto estremamente significativo sulla dinamica dell'acquifero, sia dal punto di vista del flusso che dal punto di vista del trasporto. In tal caso, sarebbe necessario risolvere le equazioni di Navier-Stokes.

In generale all'interno di un acquifero carsico è possibile distinguere tre tipologie di conducibilità idraulica differenti, una associata alla matrice porosa, una associata alle fratture e una associata ai condotti, secondo la schematizzazione di [Tabella 1](#).

Tabella 1. Schematizzazione di un acquifero fratturato e/o carsico in termini di conducibilità idraulica ed equazioni di flusso associate (da [Ghasemizadeh et al. 2012](#))

Conducibilità Idraulica	Dimensioni	Tempi di residenza	Equazioni di flusso	Distribuzione spaziale
Matrice	da μm a mm	Lunghi	Legge di Darcy, flusso laminare	Continua
Frattura	Da 10 μm a 10 mm	Intermedi	Leggi di tipo cubico	Locale
Condotti	> 10 mm	Brevi	Legge di Darcy-Weisbach, flusso turbolento	Locale

In linea generale, non è possibile stabilire a priori se il flusso in un acquifero fratturato e/o carsico possa essere modellato mediante l'eq. 1, e quindi se il flusso sia globalmente e/o localmente di tipo laminare. In realtà quale tipo di modellazione adottare e quindi quali equazioni utilizzare non è una caratteristica intrinseca dell'acquifero, ma dipende dal fenomeno che si vuole modellare, dai dati disponibili, dagli obiettivi del modello. In maniera estremamente semplificata potremmo ribaltare l'impostazione dicendo: se i dati osservati (in termini di altezze piezometriche e/o portate in ingresso o uscita dal sistema) sono riproducibili utilizzando un approccio di tipo laminare, allora l'acquifero dal punto di vista del flusso ha un comportamento di tipo darcyano e quindi modellabile mediante l'eq. 1. E' tuttavia evidente che in molti acquiferi fratturati, specie in presenza di fratture di grandi dimensioni o condotte, un approccio di tipo darcyano non permette di simulare i dati osservati, né in termini di altezze

piezometriche (la cui osservazione comunque spesso non è disponibile), né in termini di portate erogate. Consideriamo, a titolo di esempio, la portata erogata dalla sorgente Boschetto (regione Umbria), mostrata in [Figura 5](#).

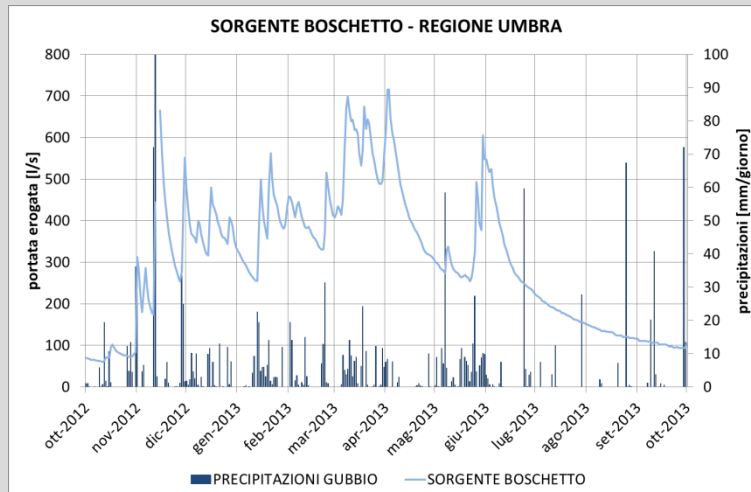


Figura 5. Portata erogata dalla sorgente Boschetto (regione Umbria) dal 1/10/2012 al 1/10/2013 (fonte: ARPA Umbria) e precipitazioni giornaliere registrate nel pluviometro di Gubbio nel medesimo periodo (fonte: Regione Umbria - Servizio Idrografico Regionale)

Nell'esempio di [Figura 5](#), la portata erogata dalla sorgente è probabilmente determinata da un doppio circuito, uno riconducibile alla matrice porosa che modula l'andamento annuale dell'idrogramma (portate crescenti nel semestre autunno-inverno), e uno riconducibile al sistema delle fratture che determina la risposta rapida agli eventi piovosi. Nel caso presentato, il comportamento idraulico dell'acquifero non può essere modellato correttamente con un approccio esclusivamente poroso, ma entrambi i circuiti devono essere presi in considerazione.

La ricerca di una soluzione dell'equazione (1) presenta due tipi di problemi:

1. L'equazione di flusso può essere risolta analiticamente solo in casi particolari² e relativamente semplici.
2. Una soluzione analitica della (1) richiederebbe la definizione *punto per punto* dei parametri idrogeologici e dei termini di sorgente. Nella pratica, invece, i parametri idrogeologici sono misurati o stimati solamente con un numero limitato di prove in campo o in laboratorio su campioni; inoltre, tali stime sono rappresentative di un determinato volume o area e dunque risultano scala-dipendenti (vedi anche 6.4, 8.3 e 8.7).

Per questo motivo, a partire dagli anni 1960, quando si è diffuso l'utilizzo di calcolatori, sono stati implementati codici di calcolo che utilizzano tecniche numeriche per risolvere l'equazione di flusso. Tali tecniche sono basate sulla discretizzazione del dominio spaziale e del dominio temporale in un numero finito di elementi. In [Figura 6](#) sono mostrati due esempi di discretizzazione del dominio spaziale.

I due esempi mostrati in [Figura 6](#) fanno riferimento a due diverse tecniche di discretizzazione del dominio spaziale, che sono tipicamente associate a diverse tecniche di discretizzazione degli operatori

² Un esempio di soluzione analitica dell'equazione di flusso è l'equazione di Theis, ampiamente utilizzata nella pratica idrogeologica per l'interpretazione delle prove di portata in un pozzo. Essa, infatti, è la soluzione analitica dell'equazione di flusso che si ottiene nel caso di flusso radiale intorno a un pozzo che estrae una portata costante da un acquifero confinato, omogeneo e isotropo, in assenza di leakage e con condizioni al contorno costanti all'infinito.

differenziali che compaiono nell'equazione di flusso: la *tecnica delle differenze finite* (Figura 6, sinistra) e la *tecnica degli elementi finiti* (Figura 6, destra).

La tecnica delle *differenze finite* permette di sviluppare un modello numerico discretizzando il dominio spaziale mediante elementi rettangolari o quadrati (nel caso di un dominio bidimensionale) e mediante elementi cubici o a forma di parallelepipedo (nel caso di un dominio tridimensionale); ad ogni elemento di discretizzazione è associato un nodo, ubicato nel suo centro.

La tecnica degli *elementi finiti* consente invece di discretizzare il dominio spaziale anche con elementi triangolari (nel caso 2D) o tetraedrici (nel caso 3D), permettendo così di variare più agevolmente la dimensione degli elementi all'interno del dominio; i vertici di ogni elemento di discretizzazione definiscono i nodi della griglia. Essa inoltre permette di trattare qualsiasi direzione di anisotropia. Per tale motivo la tecnica degli elementi finiti risulta particolarmente efficace in situazioni nelle quali la geometria del sistema è particolarmente complessa (ad es: presenza di faglie o, a scala più di dettaglio e/o lenti di argilla). Considerazioni simili valgono per le tecniche delle differenze finite integrate e dei volumi finiti.

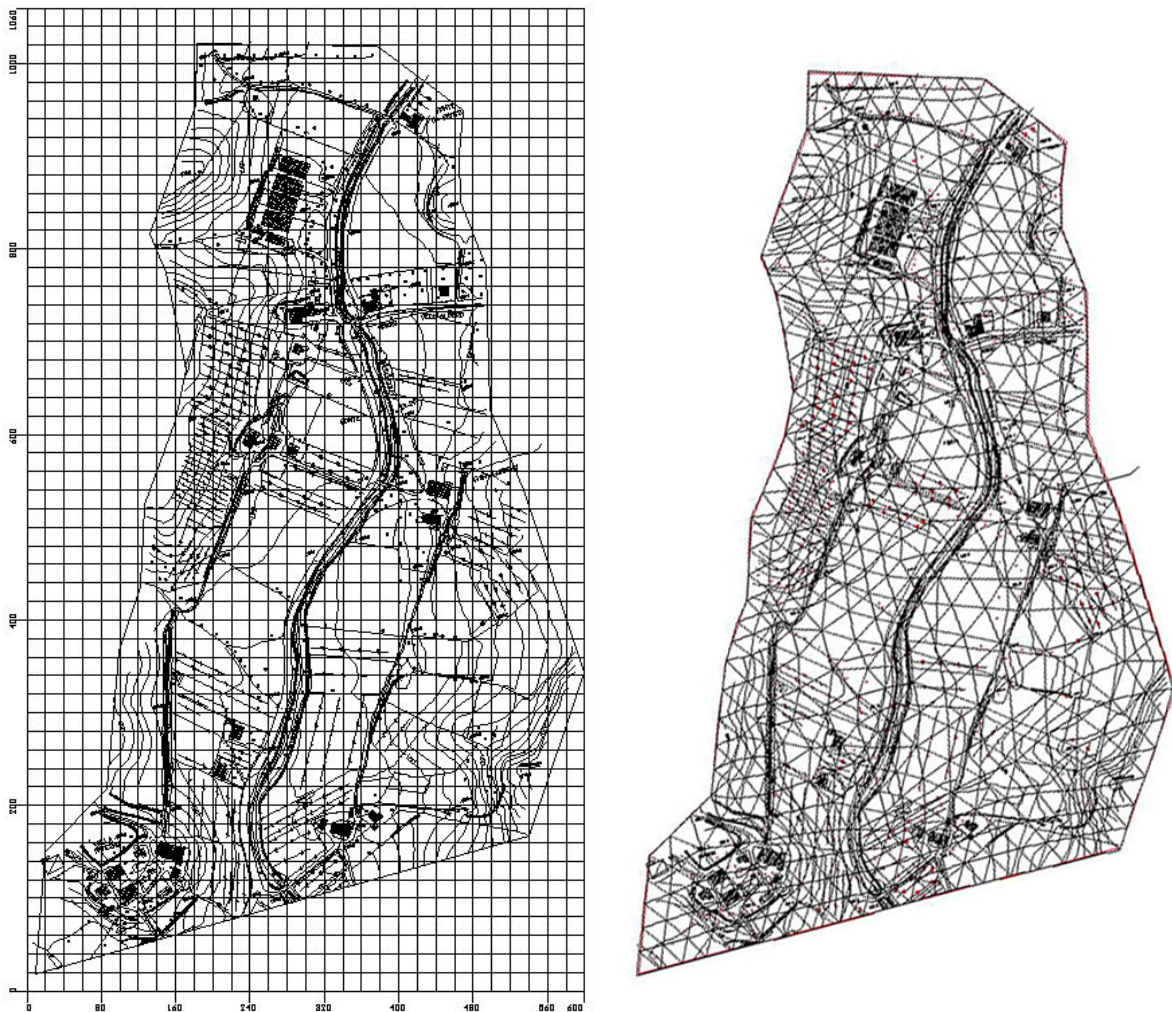


Figura 6. Discretizzazione del dominio spaziale mediante una griglia regolare tipicamente utilizzata con la tecnica delle differenze finite (sinistra) e mediante una griglia irregolare tipicamente utilizzata con la tecnica degli elementi finiti (destra). Da [Andersson and Woessner, 1992](#).

Dal punto di vista degli operatori differenziali la tecnica delle differenze finite approssima le derivate parziali del primo e del secondo ordine mediante differenze algebriche calcolate tra i valori dei potenziali riferiti ai *nodi* della griglia di discretizzazione adottata; la tecnica degli elementi finiti calcola la soluzione di flusso come combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma (shape functions).

In entrambi i casi una soluzione numerica dell'equazione di flusso, cioè il risultato di una simulazione del modello, fornirà il valore dell'altezza piezometrica *in ogni nodo della discretizzazione e ad ogni passo temporale*.

Nel seguito faremo sempre riferimento a modelli numerici, intesi come modelli matematici che descrivono mediante equazioni differenziali i processi fisici di flusso in mezzi porosi e che sono risolte in maniera approssimata mediante tecniche di tipo numerico.

3 IMPOSTAZIONE GENERALE DELLO SVILUPPO DI UN MODELLO NUMERICO

L'implementazione di un modello numerico di flusso segue diverse fasi di lavoro, la cui buona organizzazione preliminare è alla base di una corretta riuscita del modello stesso. In [Figura 7](#) è riportato il diagramma di flusso che sintetizza i passi necessari per lo sviluppo di un modello numerico per l'idrogeologia.

1. *Fase 1. Definizione degli obiettivi del modello.* Questa fase prevede l'individuazione degli obiettivi del modello e della scala spaziale e temporale del fenomeno che si intende modellare ([capitolo 4](#)).
2. *Fase 2. Analisi dei dati disponibili.* Obiettivo di questa fase è la raccolta e l'organizzazione dei dati sperimentali disponibili e la valutazione della loro adeguatezza rispetto agli obiettivi del modello individuati nella fase 1 ([capitolo 5](#)).
3. *Fase 3. Elaborazione del modello concettuale di riferimento.* Idealizzazione astratta e semplificata di un sistema reale data dall'insieme dei processi e dei parametri che caratterizzano il flusso idrico in un acquifero: caratteristiche geometriche, i dati relativi alle variabili di input/output e ai parametri idrogeologici vengono unificati in un unico schema interpretativo che descrive le caratteristiche del flusso idrico sotterraneo alla scala scelta ([capitolo 6](#)).
4. *Fase 4. Scelta del codice di calcolo.* Nel presente documento per "codice di calcolo" si intende sia il codice mediante il quale vengono effettuate le simulazioni, sia gli eventuali codici di pre e post processing ([capitolo 7](#)).
5. *Fase 5. Implementazione del modello numerico.* Tale fase si articola in tre obiettivi: a) trasposizione in termini matematici del dominio spaziale e temporale di flusso e del comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera del dominio spaziale; b) definizione degli schemi di discretizzazione spaziale e temporale; c) attribuzione dei valori numerici dei dati di input del modello (condizioni al contorno, parametri idrogeologici, termini di sorgente ed eventuali condizioni iniziali) per tutti gli elementi che costituiscono la discretizzazione spaziale e temporale ([capitolo 8](#)).
6. *Fase 6. Fase di calcolo.* In un approccio di tipo numerico, il risultato di una simulazione è dato dalla soluzione di un sistema algebrico di equazioni, eventualmente non lineari. La scelta della tecnica risolutiva utilizzata per la ricerca della soluzione può condizionare in maniera significativa il risultato delle simulazioni. Nel [capitolo 9](#) verranno presentate e brevemente discusse alcune problematiche legate alle tecniche numeriche abitualmente utilizzate per la soluzione dell'equazione di flusso (1).
7. *Fase 7. Calibrazione del modello.* Nel corso di questa fase si cercano, mediante opportune metodologie, i valori ottimali dei parametri idrogeologici e/o delle variabili di input tali che la condizione di flusso modellata sia la più vicina possibile alla condizione di flusso osservata ([capitolo 10](#)).
8. *Fase 8. Validazione del modello.* La fase di validazione del modello consiste nell'utilizzare il modello calibrato per simulare una situazione di flusso differente da quella utilizzata in fase di calibrazione. Se la validazione non dà risultati soddisfacenti può essere necessaria una revisione sia della fase di calibrazione, sia della fase di elaborazione del modello concettuale ([capitolo 11](#)).
9. *Fase 9. Analisi di sensibilità e utilizzo del modello come strumento previsionale.* Il modello numerico, una volta calibrato, validato e giudicato attendibile, può essere utilizzato come strumento previsionale, al fine di valutare le variazioni del campo di moto e della quantità di acqua immagazzinata o rilasciata indotte da variazioni degli input ([capitolo 12](#)). È opportuna una valutazione a posteriori dei risultati attraverso un'analisi di sensibilità, mediante la quale valutare l'incertezza delle previsioni fornite da un modello e quindi il suo livello di affidabilità come strumento gestionale.

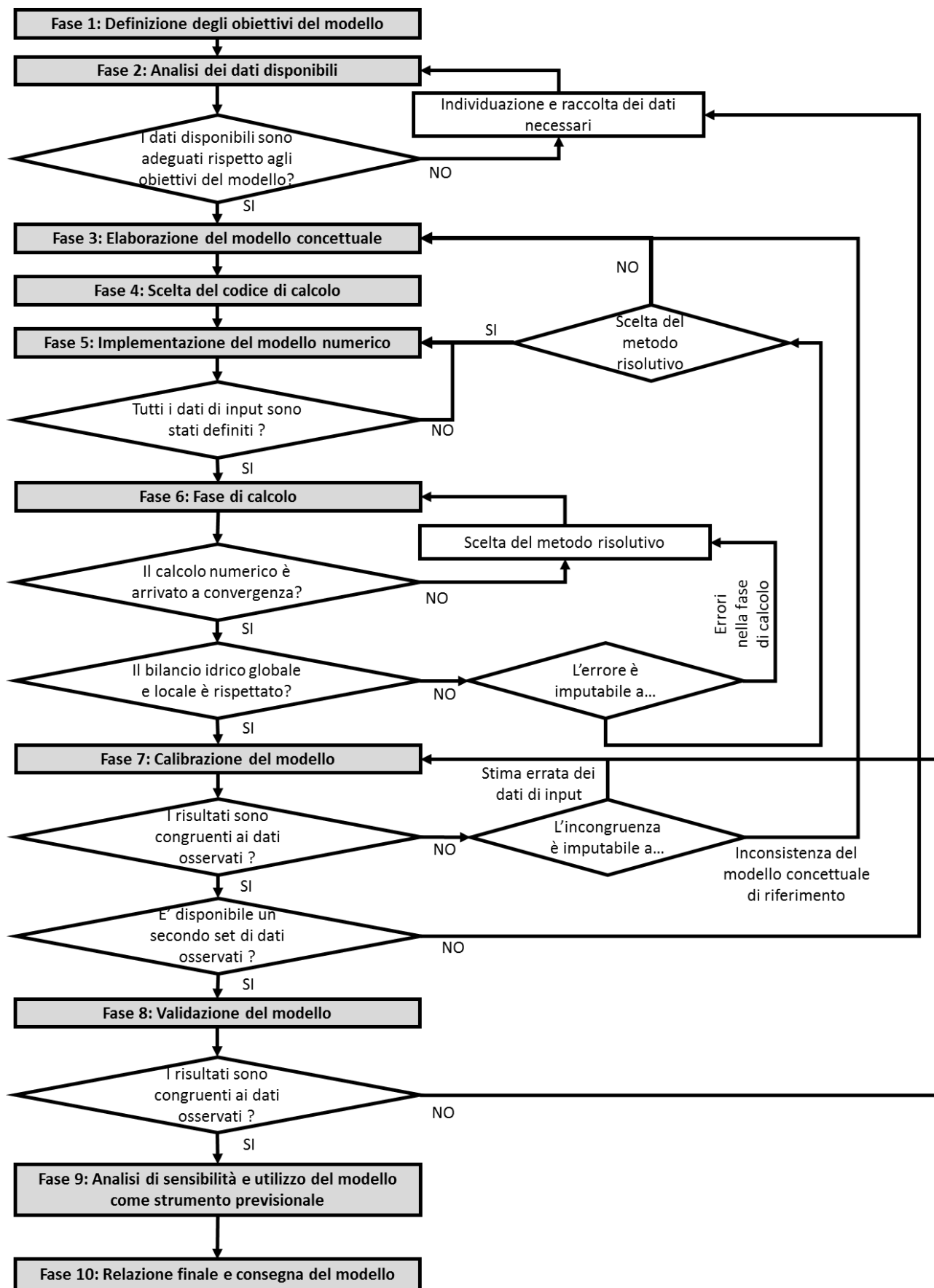


Figura 7. Diagramma di flusso relativo allo sviluppo di un modello numerico

L'analisi di sensibilità consiste nel quantificare l'incertezza nella stima di ciascuno dei parametri idrogeologici e delle variabili forzanti e stimare la conseguente incertezza sui valori del campo piezometrico modellato e delle portate associate.

10. *Fase 10. Elaborazione della relazione finale e consegna del modello.* Gli elaborati dovrebbero comprendere, oltre ad una relazione esaustiva, tutti i files necessari alla replica delle simulazioni e ad una eventuale implementazione successiva del modello ([capitolo 13](#)).

È opportuno che la fase di organizzazione del lavoro e di assegnazione degli incarichi, che viene svolta prima della fase di sviluppo del modello, sia concordata tra committente e modellista già durante la stesura del capitolato tecnico. In particolare è importante che vi sia specificato:

- quali dati di partenza vengono forniti, da chi e in quale formato. I dati dovrebbero essere sempre forniti in formato elettronico; i dati che hanno dipendenza spaziale dovrebbero essere forniti in formato GIS su una base cartografica georiferita univoca e coerente;
- chi sviluppa il modello concettuale di riferimento. In particolare per quanto riguarda la ricostruzione idrostratigrafica, occorre specificare se chi elabora il modello concettuale fornisce anche la geometria delle superfici che definiscono gli acquiferi e gli acquitardi;
- la scelta del codice di calcolo da utilizzare per la modellazione ed, eventualmente, la scelta di altri strumenti matematico-statistici di elaborazione (ad esempio, per l'interpolazione geostatistica);
- le modalità di presentazione dei risultati;
- l'eventuale consegna al committente di tutti i file necessari per la replica delle simulazioni, ovvero dei soli file relativi agli output del modello, utilizzando un formato concordato;
- l'eventuale consegna al committente di codici di calcolo proprietari sviluppati ad hoc per il progetto.

4 FASE 1 - DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI DEL MODELLO

La definizione degli obiettivi del modello deve essere condotta *a priori* ed in maniera indipendente dalla reale disponibilità di dati: infatti è proprio sulla base degli obiettivi individuati che deve essere condotta l'analisi dei dati disponibili e che deve essere valutato se questi sono sufficienti per lo sviluppo di un modello rappresentativo della realtà in esame.

In linea del tutto generale, e non esaustiva, possiamo elencare i seguenti fra gli obiettivi possibili di un modello numerico di flusso:

- valutazione del bilancio idrogeologico globale di un acquifero;
- valutazione delle interazioni tra l'acquifero e i corpi idrici superficiali;
- valutazione dell'impatto sull'acquifero dovuto alle variazioni nello spazio e nel tempo delle condizioni di ricarica all'acquifero, inclusi gli effetti dei cambiamenti climatici;
- sostenibilità di progetti di gestione della risorsa idrica mediante perforazione e attivazione di pozzi di prelievo o altro (alla scala locale o di bacino);
- individuazione dell'area di ricarica, di influenza dell'emungimento e dell'area di salvaguardia nell'intorno di pozzi;
- studio dell'impatto sull'acquifero di opere sotterranee quali gallerie;
- studio del flusso a scala di sito o a scala di bacino per la simulazione del movimento advettivo per simulare il moto di inquinanti non reattivi, solidali con l'acqua; tale studio può costituire la base di successivi modelli di trasporto che includano processi di diffusione e/o dispersione, reazione, ecc (capitolo 14);
- studio dell'efficacia di eventuali misure per la messa in sicurezza e/o la bonifica di siti contaminati;
- analisi sull'incertezza, l'affidabilità e la rappresentatività dei dati sperimentali;
- progettazione di reti di monitoraggio.

Affinché la definizione degli obiettivi sia completa, è necessario che siano altresì individuati:

- i *fenomeni* la cui modellazione può fornire informazioni rispetto agli obiettivi prospettati;
- le *variabili di input*, cioè le variabili che descrivono tutti quegli elementi che si ritiene costituiscano una causa del fenomeno in esame. Il tipo e la qualità dei dati necessari per descrivere compiutamente le variabili di input;
- le *variabili di output* che descrivono i fenomeni in esame e la loro scala spaziale e temporale (vedi box 7). Il tipo e la qualità dei dati relativi alle variabili di output necessari per descrivere compiutamente i fenomeni in esame;
- i *parametri idrogeologici* necessari e la loro scala spaziale e temporale in relazione agli obiettivi del modello.

L'individuazione degli elementi prima elencati consente di sviluppare un'analisi *a priori* volta a identificare i dati necessari per il raggiungimento degli obiettivi identificati e consentire un confronto con i dati effettivamente disponibili (capitolo 5).

E' opportuno inoltre sottolineare come la definizione degli obiettivi di un modello vincoli anche l'accuratezza delle previsioni necessaria: tale accuratezza è strettamente legata alla scala spaziale e temporale caratteristica dei processi di interesse in relazione agli obiettivi del modello stesso.

In Tabella 2 sono mostrati alcuni esempi relativi alla definizione degli obiettivi di un modello numerico e le relative analisi.

Tabella 2. *Tempi di analisi degli obiettivi di un modello numerico*

	ESEMPIO 1	ESEMPIO 2	ESEMPIO 3
OBIETTIVO	Valutazione dell'efficacia di una barriera idraulica nella captazione di inquinanti in un sito contaminato	Valutazione della sostenibilità sul lungo periodo degli emungimenti da un cluster di pozzi	Valutazione dell'interazione falda-fiume
FENOMENO	Variazione del campo di moto indotto dalla messa in funzionamento di pozzi	Variazioni delle altezze piezometriche e dei flussi indotte dagli emungimenti e dalla variabilità nel tempo dei termini forzanti	Portata di scambio tra acquifero e corpi idrici superficiali
VARIABILI DI OUTPUT	Altezze piezometriche	Altezze piezometriche, portate di scambio con corpi idrici superficiali	Altezze piezometriche e idrometriche; conseguenti modalità di scambio tra acquifero e corpi idrici superficiali
VARIABILI DI INPUT	Portate (o altezze piezometriche) al contorno, posizione e portata dei pozzi	Variabilità nel tempo della ricarica, del pompaggio, eventuali variazioni degli scambi con corpi idrici superficiali.	Portate al contorno, altezze idrometriche dei corpi idrici superficiali, eventuali punti di captazione, infiltrazione efficace
PARAMETRI IDROGEOLOGICI	Conducibilità idraulica (nel piano e in z), coefficiente di immagazzinamento.	Conducibilità idraulica, coefficiente di immagazzinamento, conduttanze dei corpi idrici superficiali	Conduttanza dei corpi idrici superficiali, conducibilità idrauliche, coefficiente di immagazzinamento
SCALA SPAZIALE	da decimetrica a ettometrica	da chilometrica a decine di chilometri	da ettometrica a chilometrica
SCALA TEMPORALE	da giornaliera a mensile	da stagionale a pluriennale	da giornaliera a stagionale

Box 7. La scala spaziale e temporale nella modellazione numerica

Per scala spaziale di riferimento si intende la distanza media rispetto alla quale è osservabile una variabilità delle grandezze in gioco significativa, in relazione al fenomeno che si vuole modellare; in maniera analoga, per scala temporale di riferimento si intende l'intervallo temporale medio rispetto al quale è osservabile una variabilità delle grandezze in gioco significativa, in relazione al fenomeno che si vuole modellare.

L'individuazione della scala spaziale e temporale di riferimento è particolarmente importante nella definizione dei possibili obiettivi di una modellazione numerica dal momento che i fenomeni coinvolti possono fare riferimento a scale molto diverse le une dalle altre.

Si assuma, ad esempio, di voler modellare il flusso idrico alla scala di sito, per la simulazione della diffusione di contaminanti; la scala spaziale di riferimento sarà nell'ordine delle decine o al massimo centinaia di metri, dal momento che è la variabilità delle caratteristiche idrodipersive del terreno a questa scala che determina il percorso dei contaminanti. È necessario, allora, che siano disponibili dati distribuiti nello spazio alla medesima scala.

Un discorso analogo può essere fatto relativamente alla scala temporale. Si assuma di voler modellare l'impatto sull'acquifero dovuto a cambiamenti climatici; la scala temporale di riferimento sarà almeno dell'ordine delle decine di anni e, di conseguenza, lo sviluppo di un modello numerico per tali obiettivi necessiterà di osservazioni relative sia alle forzanti atmosferiche che alle piezometrie alla medesima scala temporale.

Riassumendo Fase 1: Definizione degli obiettivi del modello



- ✓ definizione degli obiettivi
- ✓ individuazione del fenomeno che si intende modellare
- ✓ individuazione delle variabili di input
- ✓ individuazione delle variabili di output
- ✓ individuazione dei parametri necessari

Figura 8. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 1 “Definizione degli obiettivi del modello”

5 FASE 2 - ANALISI DEI DATI DISPONIBILI

In questa fase sarà verificata l'adeguatezza dei dati disponibili rispetto agli obiettivi del modello definiti in fase 1, valutando in dettaglio:

1. La disponibilità di dati sperimentali relativi alle variabili di input e output individuate in fase 1.
2. La disponibilità di dati sperimentali relativi ai parametri idrogeologici individuati in fase 1.
3. L'adeguatezza (sia in termini di qualità che di numero) dei dati disponibili al fine di una descrizione esaustiva del fenomeno che si intende modellare e, quindi, al fine di una calibrazione attendibile del modello numerico, secondo il principio "garbage IN, garbage OUT" (Figura 9).
4. L'incertezza legata a ciascun dato e le eventuali fonti di errore.

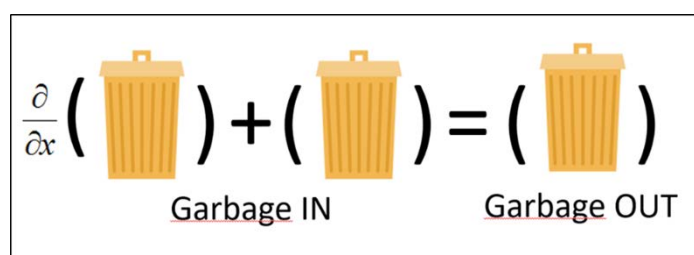


Figura 9. L'inadeguatezza sia qualitativa che quantitativa dei dati in ingresso produrrà dei risultati non rappresentativi del fenomeno che si intende modellare

5.1 Classificazione dei dati

Alla fase di analisi dei dati disponibili si suggerisce di preporre una fase di classificazione dei dati disponibili, ad esempio secondo lo schema presentato in Tabella 3. Scopo della fase di classificazione è l'organizzazione dei dati disponibili secondo uno schema prestabilito in modo da:

1. Facilitare lo scambio di informazioni tra chi fornisce i dati e il modellista.
2. Introdurre criteri di valutazione sulla qualità del dato.
3. Agevolare la valutazione dell'adeguatezza dei dati disponibili rispetto agli obiettivi del modello.

La classificazione dei dati proposta consente inoltre di mettere in luce elementi utili per la valutazione del range di incertezza relativo ai dati sperimentali disponibili.

Tabella 3. Schema possibile di classificazione dei dati

CATEGORIE DI CLASSIFICAZIONE	CRITERI DI CLASSIFICAZIONE
NATURA (5.1.1)	<ul style="list-style-type: none">• dato osservato• dato stimato• dato di letteratura
TIPOLOGIA (5.1.2)	<ul style="list-style-type: none">• dato quantitativo• dato qualitativo
MODALITA' DI ORGANIZZAZIONE (5.1.3)	<ul style="list-style-type: none">• GIS (data base georiferito)• dati tabellari digitalizzati e georiferiti• dati tabellari digitalizzati e non georiferiti• dati su supporto cartaceo

La classificazione dei dati secondo uno schema quale quello di [Tabella 3](#) può essere svolta sia da parte di chi fornisce i dati sperimentali, allo scopo di facilitare lo scambio di informazioni con il modellista, sia da parte del modellista al fine di valutare l'adeguatezza dei dati ricevuti rispetto all'implementazione del modello.

5.1.1 *Classificazione in funzione della natura dei dati*

Una prima valutazione di carattere qualitativo riguarda la *natura* del dato, intendendo con tale termine distinguere tra dati *osservati* e dati *stimati*. Al primo gruppo fanno riferimento i dati direttamente misurati, al secondo fanno riferimento i dati ottenuti per mezzo di un qualche modello interpretativo dei dati osservati. In generale è buona norma anche nel caso di dati stimati che siano forniti al modellista tutti i dati osservati (se disponibili), eventualmente corredati dalle informazioni frutto di elaborazioni successive. Occorre tuttavia sottolineare che la distinzione tra dati "osservati" e dati "stimati" può essere piuttosto labile, dal momento che una misura è quasi sempre frutto di un modello interpretativo. Tuttavia, come verrà spiegato nel [box 8](#) mediante alcuni esempi pratici, tale distinzione può fornire elementi operativi per la stima dell'incertezza dei dati stessi.

In assenza di informazioni dirette sul sito in esame è pratica comune, nello sviluppo di modelli numerici, fare ricorso a *dati di letteratura* per integrare (o sostituire quando non siano disponibili) i dati sperimentali. E' tuttavia di fondamentale importanza che chi sviluppa il modello, in fase di valutazione dei dati disponibili e di analisi dei limiti del modello, comunichi con chiarezza quali dati sono stati ricavati da valori di letteratura, a quali fonti bibliografiche si faccia riferimento e con quale confidenza si possano considerare rappresentativi della situazione reale.

Box 8. Esempi di dati osservati e dati stimati

Possiamo considerare esempi di dati osservati:

- il dato di precipitazione misurato mediante pluviometro;
- la temperatura dell'aria misurata mediante termometro;
- l'altezza piezometrica misurata;
- la portata estratta da un pozzo attrezzato con un misuratore di portata;
- ...

Viceversa, una mappa piezometrica è sempre un dato stimato, dal momento che è il risultato di un'interpolazione in base alla quale un insieme di dati puntuali osservati (le altezze piezometriche) viene elaborato, consegnando un'informazione di tipo areale. L'elaborazione consiste in questo caso nell'interpolazione dei dati puntuali di altezza piezometrica mediante una o più tecniche scelte e giustificate opportunamente dall'operatore.

Un secondo esempio di dato stimato è costituito dal valore della trasmissività stimato sulla base di una prova di portata. In questo caso i dati misurati sono la variazione nel tempo dell'altezza piezometrica nel pozzo di emungimento e in piezometri ricadenti all'interno del cono di emungimento del pozzo, e la portata estratta. Il valore della trasmissività è stimato sulla base di equazioni (Thiem, Theis-Jacob, ecc) che presuppongono la verifica di alcune ipotesi di partenza. Tale valore risulta dunque frutto di elaborazioni successive alla misura.

Un terzo esempio di dato stimato è costituito dalla ricostruzione di una discontinuità geologica in base a prospezioni geoelettriche: il dato misurato, in questo caso, è la coppia di intensità di corrente che circola nel terreno attraverso il dipolo energizzante e la differenza di potenziale misurata con il dipolo potenziometrico, da cui si ricava prima la resistività apparente e quindi, attraverso inversione, la distribuzione spaziale delle resistività elettriche, dalla quale si ricava infine la ricostruzione di eventuali discontinuità geologiche, sulla base di modelli interpretativi.

È evidente, dunque, che in particolar modo nel caso di dati stimati occorre valutare non solo l'incertezza connessa con la misura diretta delle grandezze in gioco, ma anche l'adeguatezza rispetto alla situazione reale del modello interpretativo utilizzato nella stima.

5.1.2 *Classificazione in funzione della tipologia dei dati.*

I dati disponibili possono essere di tipo *qualitativo* o *quantitativo*.

I dati di tipo quantitativo sono forniti in termini numerici, eventualmente con un certo *range* di incertezza; in letteratura sono talvolta chiamati *hard data*.

I dati di tipo qualitativo (talvolta chiamati *soft data*) sono tutti quelli forniti in termini descrittivi e dei quali non si conosce il valore numerico. Ad esempio, un'informazione del tipo "esiste un flusso attraverso un margine" è un'informazione di tipo qualitativo; essa deve comunque essere tenuta in considerazione in fase di elaborazione del modello concettuale di riferimento e può essere estremamente utile anche nelle fasi di calibrazione e validazione.

5.1.3 *Classificazione in funzione della modalità di organizzazione dei dati.*

In linea del tutto generale possiamo distinguere tra dati organizzati su supporto *informatico* e dati organizzati su supporto *cartaceo*. Tra i dati organizzati su supporto informatico distinguiamo i dati organizzati mediante *Geographic Information System (GIS)*, ovvero data base georiferiti e organizzati in Sistemi Informativi Territoriali, e i dati organizzati in forma tabellare mediante fogli di lavoro georiferiti o meno. Nel caso di dati georiferiti occorre valutare se i dati siano stati forniti con un sistema di riferimento ben definito, unico e coerente e che il sistema di riferimento adottato sia esplicitamente menzionato.

In generale risulta molto utile che tutte le informazioni siano organizzate all'interno di un *GIS* (anche in fase di presentazione dei risultati del modello), ed è opportuno che tale punto sia stabilito nella fase di accordo modellista-committente. Se il dato non è già inserito in un *GIS* è opportuno che venga georiferito e inserito nella banca dati di riferimento.

5.2 **Descrizione della qualità dei dati disponibili**

La valutazione della qualità dei dati disponibili è fondamentale nello sviluppo di un modello numerico, dal momento che l'affidabilità di quest'ultimo, cioè la sua capacità di simulare la realtà fisica, dipende dalla rappresentatività dei dati sperimentali. La qualità dei dati deve essere valutata in relazione a:

- la densità spaziale dei dati disponibili e la loro distribuzione all'interno dell'area di interesse;
- la frequenza temporale di campionamento (nel caso in cui si debbano sviluppare modelli in condizioni transitorie) e la lunghezza delle serie storiche;
- l'incertezza sulle misure sperimentali.

L'incertezza sui dati deve essere valutata in termini numerici, stimando un possibile *range* di incertezza. A tal proposito si osserva che:

- l'incertezza sui dati *osservati* è legata all'accuratezza degli strumenti di misura (o all'accuratezza delle procedure utilizzate per effettuare la misura);
- l'incertezza sui dati *stimati* è legata all'incertezza sui dati misurati e all'incertezza sulle ipotesi avanzate in fase di elaborazione (vedi [box 9](#));
- l'incertezza sui dati di *letteratura* è difficile da valutare dal momento che può essere legata a diversi fattori: a) scarsa rappresentatività del dato di letteratura rispetto alla situazione in esame; b) scarsa attendibilità del dato dovuta a scarsa affidabilità delle metodologie utilizzate per ricavarlo; c) omissione nelle fonti della descrizione delle metodologie utilizzate per la misura o l'elaborazione; d) i dati di letteratura possono fare riferimento a periodi passati in cui le condizioni dei luoghi potevano essere differenti da quelle attuali (ad esempio la quota topografica poteva essere diversa, il regime pluviometrico può essere mutato, eccetera).

La descrizione della qualità dei dati disponibili può essere sintetizzata con uno schema analogo a quello di [Tabella 4](#). Nel [box 10](#) è riportato un esempio sulla valutazione del range di incertezza di dati stimati.

Tabella 4. Schema per la descrizione dei dati sperimentali disponibili

	Valore numerico e range di incertezza	Densità spaziale	Frequenza di campionamento
Dati relativi alle variabili di input			
Dati relativi alle variabili di output			
Dati relativi ai parametri			

Box 9. Incertezza sui dati stimati

L'incertezza sui dati stimati è legata all'incertezza sui dati misurati e all'incertezza sulle ipotesi avanzate in fase di elaborazione.

Consideriamo, a titolo di esempio, la stima del valore di trasmissività T ricavato da prove di portata mediante l'equazione di Theis e Jacob: T viene calcolato in funzione dell'abbassamento Δs misurato in un piezometro ubicato ad una distanza nota dal pozzo di presa che emunge una portata Q costante nel tempo. Una parte dell'incertezza sulla stima di T è dovuta, quindi, all'incertezza sulle misure di Δs e Q . Tuttavia la formula di Theis e Jacob è valida solo sotto le ipotesi di falda confinata, mezzo infinito, omogeneo e isotropo, non disperdente, a trasmissività costante, in condizioni di flusso bidimensionale e stato iniziale stazionario ([de Marsily, 1986](#)). Una parte dell'incertezza su T è dovuta allora all'incertezza sulle ipotesi di partenza: il mezzo può essere considerato infinito? La trasmissività può essere considerata costante? È necessario, dunque, che nell'analisi del dato di trasmissività venga considerata anche questa fonte di incertezza nella valutazione del range dei possibili valori.

5.3 Valutazione dell'adeguatezza dei dati ai fini dello sviluppo del modello

Scopo finale della fase di analisi dei dati disponibili è la valutazione dell'adeguatezza dei dati ai fini degli obiettivi del modello. I dati disponibili, una volta organizzati secondo le categorie di [Tabella 4](#) (variabili di input, output, parametri idrogeologici) e dopo aver quantificato il *range* di incertezza, la densità spaziale e la frequenza di campionamento, verranno confrontati con i dati individuati *a priori* come necessari in fase di analisi degli. La rispondenza tra dati necessari e dati disponibili consentirà di verificare l'adeguatezza di questi ultimi ai fini dello sviluppo del modello ([Figura 10](#)).

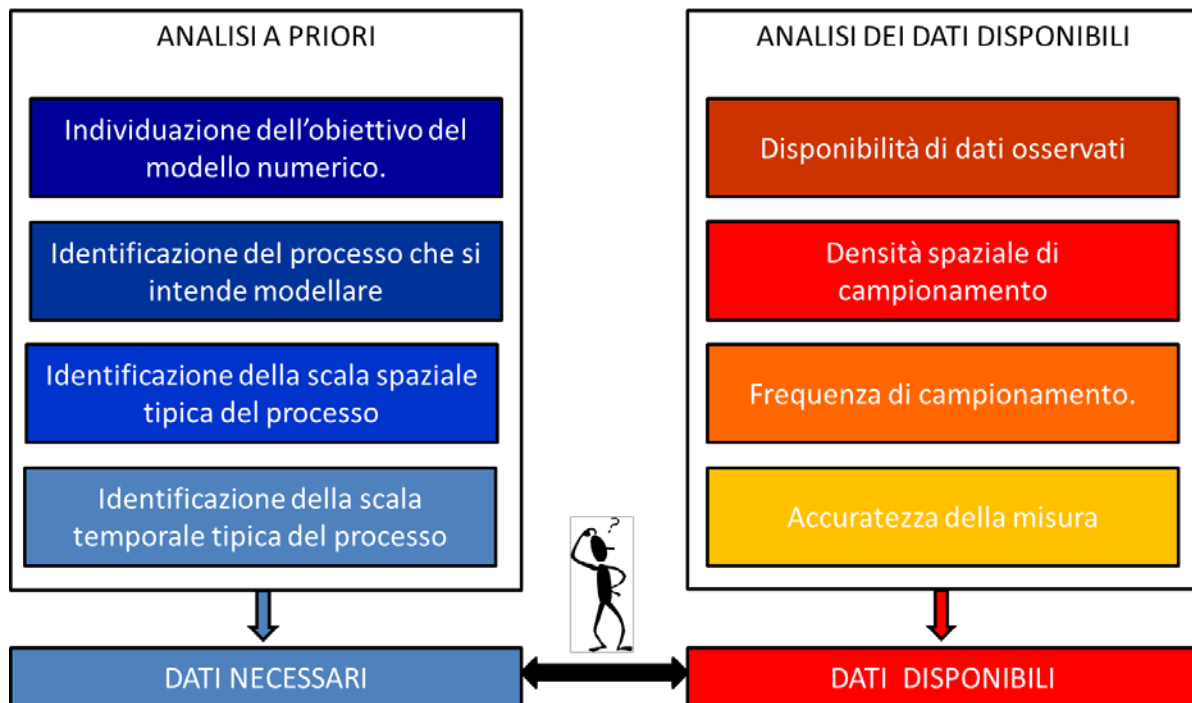


Figura 10. Diagramma di flusso per la valutazione della rappresentatività dei dati osservati disponibili

Un esempio pratico relativo alla verifica della rispondenza tra dati necessari e dati disponibili è riportato nel [box 10](#).

In definitiva l'analisi proposta permette di rispondere alle seguenti domande:

- Sono disponibili dati sperimentali relativi a tutte le variabili di input/output e a tutti i parametri idrogeologici necessari individuati in fase di definizione degli obiettivi del modello?
- I dati sperimentali hanno una densità spaziale e una frequenza di campionamento coerenti con la scala spaziale e temporale dei fenomeni che si intendono modellare?
- I dati sperimentali sono sufficientemente accurati?

Box 10. Esempio di analisi dei dati disponibili

Il caso che riportiamo nel seguito, senza voler essere esaustivo, costituisce un esempio di analisi dei dati disponibili in relazione agli obiettivi di un modello numerico. L'analisi degli obiettivi, e dunque dei dati necessari, è quella riportata in Tabella 2 come ESEMPIO 1; i "dati disponibili" sono di fantasia.

Tabella 5. Esempio di analisi dei dati disponibili in relazione agli obiettivi di un modello numerico

OBIETTIVO	Valutazione dell'efficacia di una barriera idraulica nella captazione di inquinanti in un sito contaminato.				
PROCESSO	Variazione del campo di moto indotto dalla messa in funzionamento di pozzi				
SCALA SPAZIALE	Da metrica a ettometrica				
SCALA TEMPORALE	Da giornaliera a mensile				
	DATI NECESSARI	DATI DISPONIBILI			COMMENTI
		TIPO	DENSITÀ SPAZIALE	FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO	
VARIABILI DI OUTPUT	Altezze piezometriche	Misura dell'altezza piezometrica in due pozzi ubicati nell'area in esame. La misura è stata effettuata 2 ore dopo lo spegnimento dei pozzi stessi	Dati ubicati al centro dell'area di interesse	Misura effettuata ogni 3 mesi	La frequenza temporale dei dati disponibili (3 mesi) permette di valutare le variazioni di h indotte da cambiamenti stagionali delle variabili di input, ma non da variazioni giornaliere
VARIABILI DI INPUT	Flussi (o altezze piezometriche) al contorno	Gradiente idraulico medio dedotto dalla mappa piezometrica a scala regionale	Scala regionale	Condizioni supposte stazionarie	La scala spaziale del dato disponibile sulle condizioni al contorno (scala regionale) è molto minore del dato necessario (scala di sito)
	Ricarica per infiltrazione verticale	Stima in base a dati di temperatura e pluviometria	Scala regionale	Stima media a scala mensile	Sia la scala spaziale che quella temporale dei dati disponibili sono diverse da quelle dei dati necessari. Tuttavia rispetto agli obiettivi prospettati, la variazione di infiltrazione efficace nello spazio e nel tempo potrebbe non avere incidenza
	Posizione e portata dei pozzi esistenti	Posizione e portata dei pozzi esistenti		Dati di portata emunta a scala giornaliera	Il fatto che in contemporanea non siano stati misurati anche i livelli piezometrici rende poco significativo il dato sulla portata dei pozzi esistenti
	Posizione e portata di progetto dei pozzi della barriera idraulica	Posizione e portata di progetto dei pozzi della barriera idraulica			
PARAMETRI IDROGEOLOGICI	Conducibilità idraulica	2 prove di portata effettuate nei pozzi esistenti			La posizione dei dati di k e n disponibili non consente di stimare la variabilità spaziale dei parametri idrogeologici alla scala del sito
	Coefficiente di immagazzinamento				

Nell'esempio riportato, il confronto tra dati necessari, individuati in fase di analisi degli obiettivi del modello, e dati disponibili evidenzia la necessità di incrementare il monitoraggio nel sito in studio al fine di ottenere dati sufficienti per un modello numerico affidabile. Si osserva infatti che: 1) la densità spaziale dei dati disponibili relativi ai parametri idrogeologici non consente di stimare la variabilità spaziale degli stessi alla scala di sito. In altre parole non si sa se ad una distanza di poche centinaia di metri dalla zona centrale del sito, dove sono ubicati i pozzi esistenti (quindi ancora all'interno del sito stesso), la conducibilità idraulica e/o il coefficiente di immagazzinamento siano confrontabili o meno con quelli stimati mediante le prove di portata. Assumere che la conducibilità idraulica su tutto il sito sia quella ricavata dalle prove di portata potrebbe introdurre un' approssimazione significativa; 2) le informazioni sulle condizioni al contorno sono disponibili solo a scala regionale. Il sito di interesse è ubicato all'interno di una vasta area industriale. È possibile, quindi, che la piezometria al contorno (o i flussi al contorno) sia perturbata dalla presenza nella zona di altri pozzi di emungimento e che quindi l'informazione a scala regionale non sia rappresentativa rispetto alla realtà locale.

Riassumendo Fase 2: Analisi dei dati disponibili



- ✓ classificazione dei dati disponibili
- ✓ descrizione della qualità dei dati osservati
- ✓ valutazione dell'adeguatezza dei dati disponibili

Figura 11. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 2 “Analisi dei dati disponibili”

6 FASE 3 - ELABORAZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DI RIFERIMENTO

In questa fase l'obiettivo primario è quello di sistematizzare ed interpretare i dati disponibili ai fini di elaborare un modello idrogeologico concettuale di riferimento

Per modello concettuale di riferimento si intende lo schema interpretativo delle caratteristiche significative e dei principali processi attivi nell'acquifero in esame in relazione all'obiettivo dello studio che sintetizza in modo coerente i dati osservati (sia quantitativi che descrittivi); il modello numerico traspone in termini quantitativi il modello concettuale utilizzando tutti i dati a disposizione (compresi quelli descrittivi), mettendoli tra loro in relazione mediante equazioni della fisica matematica. Ciò implica che un modello di flusso non ha come obiettivo la semplice "traduzione" in termini matematici di un modello concettuale dato una volta per tutte, ma è uno strumento per verificare la coerenza fisica (e quindi quantitativa) del modello concettuale elaborato. [Zheng and Bennet \(1995\)](#) sostengono che *"One of the most useful things about a numerical model is that it provides a tool to test and improve the conceptual model of a field site"*³.

In quest'ottica, è importante ribaltare l'impostazione culturale corrente secondo la quale il lavoro dell'idrogeologo che elabora il modello concettuale di riferimento precede il lavoro del modellista: in realtà il modello numerico è uno degli strumenti più utili per l'elaborazione di un coerente modello concettuale e dunque il lavoro dell'idrogeologo e del modellista, figure che a volte coincidono nella stessa persona, dovrebbero procedere parallelamente in modo iterativo in un continuo scambio di informazioni ([Figura 12](#)).

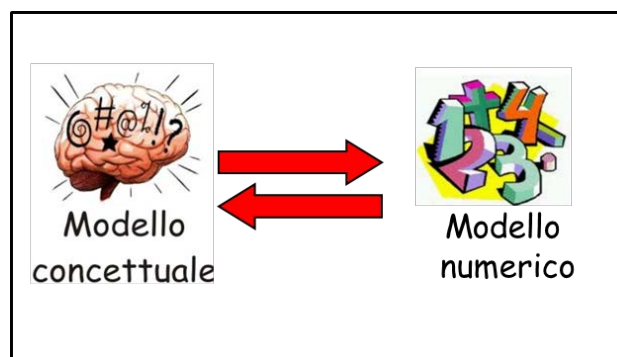


Figura 12. Il modello concettuale ed il modello numerico devono interfacciarsi iterativamente

Dalla fase di elaborazione del modello concettuale di riferimento devono emergere:

- l'individuazione dei limiti idrogeologici dell'acquifero e la loro relazione con l'area di interesse. Tali aree possono non coincidere (Par. 6.1);
- l'identificazione dei livelli acquiferi, acquicludi e acquitardi, e le relative geometrie, le caratteristiche di confinamento degli acquiferi (Par. 6.2);
- la stima del bilancio globale dell'acquifero e di tutti i termini che possono concorrere alla definizione del bilancio complessivo, nonché la loro distribuzione nello spazio e la variabilità nel tempo (Par. 6.3);
- la possibile distribuzione nello spazio dei parametri idrogeologici (conducibilità idraulica o trasmissività, coefficiente di immagazzinamento/porosità efficace) relativamente agli acquiferi ed acquitardi identificati (Par. 6.4);
- l'analisi delle mappe piezometriche di riferimento (Par. 6.5).

³ Una delle cose più utili di un modello numerico è il fatto che possa essere utilizzato per testare e migliorare il modello concettuale di un sito di interesse

6.1 Definizione della relazione tra limiti degli acquiferi e area di interesse

In generale è preferibile che i limiti dell'area di interesse coincidano con i limiti fisici dell'acquifero, ma a volte ciò non è possibile o per mancanza di dati o perché l'area di interesse è molto più piccola rispetto alle dimensioni dell'acquifero. Si raccomanda, in fase di elaborazione del modello concettuale di riferimento di evidenziare se i limiti dell'area di interesse coincidono o meno con i limiti idrogeologici dell'acquifero.

6.2 Identificazione degli acquiferi, acquitardi e acquicludi

Obiettivo di questa fase è l'individuazione degli acquiferi e acquitardi/acquicludi presenti nell'area di studio e la ricostruzione delle superfici che li delimitano. È importante sottolineare che tali superfici non necessariamente coincidono con i limiti che separano le diverse formazioni geologiche, ma sono le superfici che individuano le unità idrogeologiche, definite come unità caratterizzate da un unico comportamento idraulico (Anderson and Woessner, 1992; Anderson et al., 1999; Klingbeil et al., 1999).

Nel modello concettuale occorre valutare se si tratti di acquiferi liberi o in pressione e ipotizzare l'esistenza di eventuali scambi tra acquiferi sovrapposti.

6.3 Bilancio idrogeologico

Il bilancio idrogeologico è univocamente definito dai seguenti elementi (eventualmente variabili nel tempo):

- comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera dell'area di interesse;
- scambi idrici tra l'acquifero e il sistema esterno attraverso punti o aree interne al dominio di flusso;
- variazione del volume d'acqua immagazzinato nell'acquifero (o rilasciato da esso) nell'unità di tempo. Il termine di immagazzinamento è diverso da zero solo nel caso di flusso in condizioni transitorie.

6.3.1 Comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera dell'area di interesse

Il comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera dell'area di interesse determina le portate di scambio tra il sistema in esame e l'esterno attraverso i suoi margini.

Quando possibile è opportuno usare i limiti idrogeologici naturali del sistema come confini del modello che frequentemente corrispondono alla presenza di formazioni geologiche a bassa permeabilità o a un esteso corpo idrico superficiale. Limiti di tipo idraulico possono essere definiti in corrispondenza, ad esempio, di uno spartiacque sotterraneo o di linee di flusso (condizioni di flusso imposto pari a zero). In questi casi occorre valutare la stazionarietà delle condizioni durante il periodo di simulazione, poiché questi confini sono variabili nel tempo. La correttezza nella definizione dei limiti è fondamentale affinché il modello sia rappresentativo della realtà idrogeologica in esame; vanno quindi identificati con attenzione e descritti accuratamente. Qualora i confini dell'area di interesse non coincidano con i limiti idrogeologici dell'acquifero, si suggerisce di definire il bilancio idrogeologico sia sull'intero bacino che sull'area di interesse, dal momento che il bilancio dell'area di interesse è strettamente legato, almeno sulla frontiera, al flusso a scala di bacino. Il comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera dell'area di interesse viene implementato matematicamente nel modello numerico mediante l'assegnazione di opportune *condizioni al contorno* (Par. 8.5) di cui qui diamo alcune anticipazioni. Nell'individuazione di tale comportamento occorre individuare:

1. I tratti della frontiera (o le aree interne al dominio) in corrispondenza delle quali l'altezza piezometrica risulta indipendente dal valore dei termini di sorgente (sulla definizione dei *termini di sorgente* si veda oltre). Tale situazione si verifica tipicamente quando l'acquifero si

trova in contatto idraulico con un corpo idrico superficiale e l'altezza piezometrica coincide con l'altezza idrometrica. Situazioni di questo tipo vengono modellate assegnando condizioni al contorno di *Dirichlet* o di *carico imposto* o del *I tipo* (Par. 8.5).

2. I tratti della frontiera in corrispondenza dei quali sono ipotizzabili scambi idrici con l'esterno nulli. Tale frontiera coincide generalmente con tratti di frontiera paralleli al flusso oppure con superfici caratterizzate da forti contrasti di conducibilità idraulica (ad esempio, strati ghiaioso-sabbiosi limitati da strati argillosi). E' questo il caso, ad esempio, del flusso idrico attraverso depositi di versante che alimenta acquiferi di valle. Gli scambi al contorno di questo tipo vengono modellati assegnando condizioni al contorno di *Neumann* o di *flusso imposto* o del *II tipo* (Par. 8.5).
3. I tratti della frontiera in corrispondenza dei quali sono ipotizzabili scambi idrici con l'esterno diversi da zero. È il caso, ad esempio, di zone pedemontane, in corrispondenza delle quali si infiltra l'acqua di ruscellamento raccolta sui versanti oppure di aree nelle quali avvengono scambi tra corpi idrici superficiali e acquifero governati dalle differenze di potenziale tra essi o, ancora, di tratti di frontiera in corrispondenza dei quali si ipotizzano portate in ingresso / uscita da porzioni di acquifero poste a monte o a valle rispetto al dominio di interesse. Gli scambi al contorno di questo tipo vengono modellati assegnando condizioni al contorno di *Neumann* o di *flusso imposto* o del *II tipo* oppure condizioni al contorno di *Cauchy* o *miste* o del *III tipo* (Par. 8.5).

Se l'area di interesse non coincide con il bacino idrogeologico (o coincide solo in parte con esso), allora, ove non sia possibile imporre condizioni al contorno fisicamente basate, occorre effettuare alcune scelte di carattere modellistico tali da consentire un'adeguata rappresentazione della realtà. Tali problematiche verranno discusse nel paragrafo 8.5.

6.3.2 Definizione degli scambi idrici tra l'acquifero e il sistema nell'area di interesse

Esiste una molteplicità di processi che determinano scambi idrici tra l'acquifero e l'esterno, in modo puntuale o diffuso, che concorrono alla definizione del bilancio idrogeologico complessivo. Tra questi possiamo menzionare:

- La ricarica efficace dalla superficie topografica, definita come risultato del bilancio al suolo (processi di interazione suolo-atmosfera). E' opportuno sottolineare come nella definizione della ricarica efficace occorra considerare non solo le precipitazioni meteoriche, sia liquide che solide, e l'evapotraspirazione, ma anche apporti diffusi di natura antropica quali l'irrigazione.
- La portata estratta o immessa mediante pozzi, trincee, dreni o altro.
- Eventuali perdite da condotte idriche e fognarie, alimentazione gestita in impianti per la ricarica artificiale degli acquiferi, eccetera.
- Le interazioni con i corpi idrici superficiali. In questo caso il flusso idrico può essere sia verso l'acquifero che dall'acquifero al corpo idrico superficiale.
- Le portate erogate da sorgenti. In particolari contesti idrogeologici che determinano potenziali idraulici superiori alla quota della superficie topografica, il deflusso dell'acquifero può aver luogo per mezzo di scaturigini (sorgenti puntuali o lineari). Chiaramente tali scaturigini possono essere ubicate sia all'interno dell'area di interesse che sulla frontiera.

Gli scambi idrici tra l'acquifero e l'esterno attraverso punti o aree interne all'area di interesse sono implementati matematicamente nel modello numerico mediante l'assegnazione di opportuni *termini di sorgente* (Par. 8.8) o di opportune *condizioni al contorno* (Par. 8.5)

6.3.3 *Immagazzinamento idrico nell'acquifero*

L'immagazzinamento idrico è il volume di acqua rilasciata o immagazzinata dall'acquifero a seguito di una variazione nel tempo del potenziale piezometrico. Nell'equazione di flusso (1) esso è rappresentato come il prodotto tra il coefficiente di immagazzinamento S e la derivata rispetto al tempo dell'altezza piezometrica $\partial h/\partial t$. Il coefficiente S è la somma di due termini che rappresentano due meccanismi differenti di rilascio/immagazzinamento:

1. Il volume di acqua drenato da un mezzo poroso per effetto della sola gravità per unità di area di acquifero e per una variazione unitaria del carico idraulico, corrisponde alla porosità efficace n_e .
2. *L'immagazzinamento specifico* è il volume di acqua rilasciato per unità di area di acquifero per una variazione unitaria del carico idraulico, che deriva dalla compressione dell'acquifero e dall'espansione dell'acqua.

In generale, in un acquifero freatico prevale il primo meccanismo e il coefficiente d'immagazzinamento è circa uguale alla porosità efficace, in un acquifero confinato esiste solo il secondo meccanismo poiché il mezzo poroso rimane saturo.

Nella pratica tale termine può essere stimato o mediante opportune prove di portata o facendo riferimento a dati di letteratura.

6.3.4 *Stima del bilancio idrogeologico*

La stima del bilancio idrogeologico è uno degli elementi critici nello sviluppo di un modello numerico. Se questa fase dell'elaborazione del modello concettuale viene trascurata si introducono significative incertezze nel modello numerico.

In fase di elaborazione del modello concettuale è necessario identificare tutti i termini del bilancio ed indicare l'incertezza connessa con ognuno di essi e dunque il *range* dei possibili valori. L'incertezza sui termini di bilancio sarà connessa con l'incertezza sui dati misurati (ove esistano) oppure dovrà essere stimata a priori da chi sviluppa il modello concettuale.

L'organizzazione, la valutazione e la presentazione dei termini di bilancio può essere effettuata secondo lo schema di [Tabella 6](#). Nel [box 11](#) è descritto un esempio di presentazione dei termini di bilancio.

Tabella 6. Schema per l'organizzazione, la valutazione e la presentazione dei termini di bilancio

TERMINI DEL BILANCIO IDROGEOLOGICO	PORTATA		FONTE dato stimato/dato misurato/dato di letteratura	INTERVALLO DI INCERTEZZA
	IN	OUT		
flussi attraverso la frontiera del dominio				
ricarica efficace				
portata estratta da pozzi				
interazione con corpi idrici superficiali				
portata erogata da sorgenti				
altro...				

È importante sottolineare che alcuni dei termini elencati in [Tabella 6](#) possono essere rappresentativi di più voci: ad esempio, potrebbe essere necessario distinguere, all'interno della voce "portata estratta da pozzi", le portate estratte da pozzi ad uso civile e quelle estratte da pozzi ad uso industriale e/o agricolo, dal momento che spesso la fonte del dato e il metodo di stima è differente.

Occorre sempre indicare le condizioni di flusso cui i diversi termini di bilancio fanno riferimento: i valori indicati sono relativi a condizioni medie su un intervallo di tempo (ad esempio un anno)? Oppure sono relativi ad una situazione di magra o di piena?

Nel caso in cui siano disponibili più misure o più stime dei termini di bilancio relative a diverse condizioni di flusso, occorre riportare tutti i valori disponibili e dunque i bilanci relativi ad ogni condizione.

Affinché il bilancio sia fisicamente coerente occorre innanzitutto definire se si fa riferimento ad una situazione di flusso stazionaria, che corrisponde ad esempio a un bilancio su lungo periodo, o transitoria quindi con flussi che variano nel tempo. Se la situazione di flusso cui si fa riferimento è stazionaria allora la superficie piezometrica è in equilibrio dinamico e i flussi in ingresso corrispondono a quelli in uscita, quindi la somma algebrica di tutti i termini di sorgente e dei flussi attraverso la frontiera del dominio deve essere nulla; se, invece, si fa riferimento ad una situazione di flusso transitoria allora la somma algebrica di tutti i termini di sorgente e dei flussi attraverso la frontiera del dominio può essere diversa da 0 e deve essere pari alla quantità di acqua immagazzinata o rilasciata dall'acquifero nell'unità di tempo.

Box 11. Esempio di presentazione dei termini di bilancio

La stima del bilancio idrogeologico qui presentata è stata effettuata ai fini dello sviluppo del modello numerico di flusso dell'acquifero di Petrignano d'Assisi, ubicato nella Valle Umbra, per la cui descrizione dettagliata si rimanda a [Romano e Preziosi \(2010\)](#).

L'acquifero di Petrignano ([Figura 13](#), pannello a) è costituito da depositi alluvionali che poggiano su un substrato marnoso-arenaceo del Miocene, bordati a Sud, Ovest e Nord-Est da depositi lacustri e fluvio-lacustri del Villafranchiano, che costituiscono un limite idraulico a flusso nullo. Il fondo dell'acquifero è stato ricostruito mediante tecniche di tipo geostatistico sulla base delle stratigrafie di pozzo disponibili (circa 40) e di indagini geoelettriche pregresse. All'interno dell'area di studio è in funzione dalla fine degli anni '70 un campo pozzi che preleva circa 300 l/s per un bacino di utenza di 240.000 abitanti. Insistono inoltre sull'acquifero prelievi per uso agricolo e industriale.

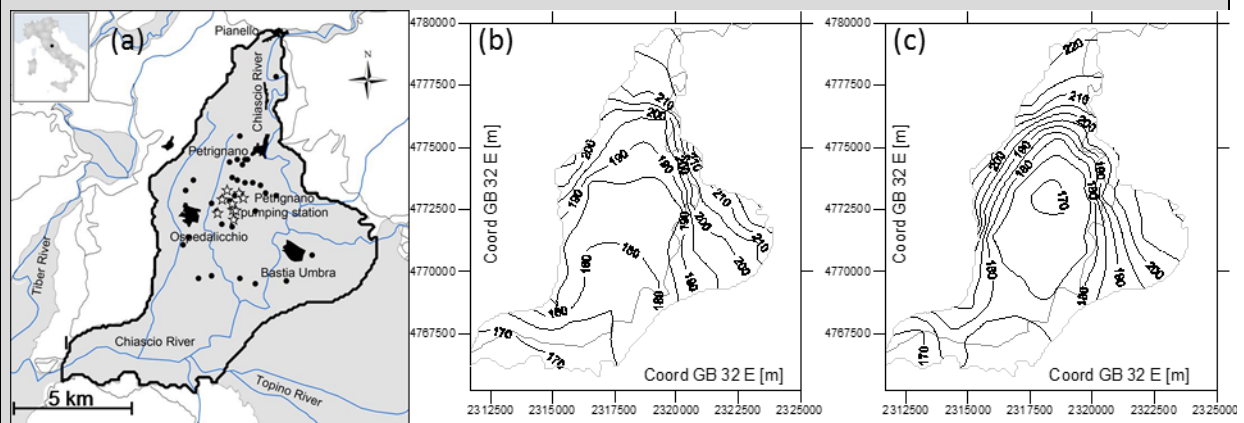


Figura 13 - Pannello (a): Dominio di flusso del modello di Petrignano d'Assisi (da Romano e Preziosi, 2010). **Pannello (b):** mappa piezometrica ricostruita riferibile a una condizione pre-sfruttamento (1974). **Pannello (c):** mappa piezometrica ricostruita riferibile a una condizione di sfruttamento dell'acquifero (2004).

La piezometria del 1974 ([Figura 13](#), pannello b), relativa ad una situazione considerata indisturbata, mostra un andamento della falda da Nord a Sud con un asse di deflusso principale nella zona centrale della piana, parallelo al fiume Chiascio che scorre sul lato orientale. L'attivazione del campo pozzi di Petrignano, ed il progressivo sfruttamento dell'acquifero a scopi agricoli, ha indotto un cono di depressione nella parte centrale della piana ([Figura 13](#), pannello c) determinando così una variazione del deflusso naturale della falda.

La [Tabella 7](#) sintetizza una stima dei termini del bilancio in condizioni di sfruttamento dell'acquifero (quindi dopo la messa in funzione del campo pozzi di Petrignano) e stazionarie.

Tabella 7. Stima dei termini del bilancio in condizioni di sfruttamento dell'acquifero (quindi dopo la messa in funzione del campo pozzi di Petrignano) e stazionarie

TERMINI DEL BILANCIO IDROGEOLOGICO IN CONDIZIONI STAZIONARIE	PORTATA (l/s)		FONTE	INTERVALLO DI INCERTEZZA
	IN	OUT	dato stimato/dato misurato/dato di letteratura	
flussi attraverso la frontiera del dominio	100		Ipotizzato sulla base del campo piezometrico osservato, stimato	±50% (±50 l/s)
ricarica efficace media (ipotesi di 200 mm/anno di I_eff)	475		Stimato (metodo Thornthwaite)	±25% (±120 l/s)
portata estratta dal campo pozzi (scopo idropotabile)		300	Misurato (dato fornito dal gestore)	±33% (±100 l/s)
portata estratta da pozzi privati a scopo irriguo		300 da maggio a agosto (100 su tutto l'anno)	Stimato sulla base dell'idroesigenza delle colture	±25% (±100 l/s)
interazione con corpi idrici superficiali (perdite dal fiume Chiascio nel tratto a monte)	180		Letteratura, (stimato, da Boila et al.,1993)	±50% (±90 l/s)
interazione con corpi idrici superficiali (alimentazione falda-fiume Chiascio nel tratto a valle)		350	Ipotesi formulata sulla base di dati idrografici	±25% (±250 l/s)

Come è possibile vedere dall'analisi sintetizzata in [Tabella 7](#), l'incertezza complessiva e sui singoli termini di bilancio può essere molto elevata, anche in casi, come quello presentato qui, nei quali si ha ampia disponibilità di dati. In particolare, nel caso dell'esempio:

- La ricarica efficace media, stimata mediante il metodo di Thornthwaite permette di individuare un range di valori possibili tra 150 mm/a e 250 mm/a.
- I campi piezometrici osservati indicano un possibile flusso in ingresso dai margini orientale e occidentale del dominio, che devono essere stimati.
- Quella relativa alla portata estratta dal campo pozzi di Petrignano non è un'incertezza propriamente detta, ma rappresenta la variabilità stagionale e interannuale dei dati di portata forniti dal gestore.
- Durante il periodo primaverile e estivo l'acquifero è utilizzato a scopo irriguo tramite diversi pozzi privati. La portata complessiva, sconosciuta, è stata stimata sulla base della distribuzione spaziale delle colture e delle idroesigenze delle singole colture
- Sono state misurate perdite dal fiume Chiascio verso l'acquifero nella zona più settentrionale della piana. Il dato di letteratura è tuttavia probabilmente affetto da elevata incertezza, dal momento che tale portata dipende dal livello idrometrico del fiume e dall'altezza freatica dell'acquifero e quindi può variare nel tempo in maniera significativa. L'interazione con il Chiascio in condizioni pre-sfruttamento dell'acquifero non si può ovviamente misurare attualmente, poiché le condizioni idrodinamiche sono fortemente cambiate.
- Nell'area più meridionale della piana, misure di portata in alveo in condizioni di magra lungo il fiume indicano un flusso idrico dall'acquifero al Chiascio. Tale stima è, tuttavia, non solo affetta da significativa incertezza a causa dell'errore sperimentale delle misure stesse, ma dipende in maniera significativa dalla relazione tra altezza idrometrica del fiume e altezza piezometrica, e dunque è estremamente variabile nel tempo. Il valore di 350 l/s indicato in [Tabella 7](#) si riferisce dunque all'ipotesi di portata necessaria per "chiudere il bilancio" in condizioni stazionarie

6.4 Stima dei parametri idrogeologici

I parametri idrogeologici che compaiono nelle equazioni che descrivono il flusso idrico negli acquiferi sono i seguenti:

- conducibilità idraulica o trasmissività;
- coefficiente di immagazzinamento (negli acquiferi confinati);
- porosità efficace (negli acquiferi freatici).

Per la definizione del campo dei valori dei parametri idrogeologici si hanno abitualmente a disposizione due tipi di informazioni: dati ricavati da prove sperimentali (prove di portata, slug test, eccetera) che hanno un valore puntuale, limitato ai dintorni del punto in cui è stata effettuata la prova, e informazioni di carattere geologico (caratteristiche litologiche, granulometriche, tessiture dei corpi idrici sotterranei ricavate da ricostruzioni geologiche, stratigrafie, prospezioni geofisiche, eccetera).

I problemi che il modellista e/o l'idrogeologo devono affrontare comprendono:

- l'identificazione della corrispondenza tra dato ricavato da prove sperimentali e gli acquiferi identificati nel modello concettuale; vanno scelte le prove che permettono di caratterizzare singoli acquiferi o acquitardi/acquicludi;
- l'interpolazione/estrapolazione dei dati puntuali all'intero dominio sulla base delle informazioni geologiche disponibili;
- il passaggio di scala dai valori determinati alla scala delle prove in campo a valori rappresentativi del volume di acquifero rappresentato dalla cella del modello (Par. 8.3);
- l'attribuzione dei valori dei parametri nelle aree per le quali non si dispone di alcun dato diretto.

Se il numero di dati disponibile è sufficiente, per distribuire il dato su tutta l'area di interesse è possibile utilizzare tecniche di tipo geostatistico. Non è possibile indicare criteri univoci per stabilire se il numero di dati disponibile permette un'interpolazione attendibile: in generale occorre valutare se la densità spaziale dei dati sperimentali può essere considerata rappresentativa rispetto alla variabilità spaziale del parametro in esame alla scala spaziale caratteristica dei fenomeni che si intendono modellare.

Nella pratica comune, tuttavia, è raro possedere informazioni dirette (sperimentali) su un numero di punti sufficiente per poter effettuare un'attendibile interpolazione geostatistica, dal momento che, come accennato sopra, le prove sperimentali sono generalmente rappresentative di una scala diversa da quella di interesse: il procedimento di interpolazione a partire da dati puntuali potrebbe portare ad assegnare su aree vaste caratteristiche idrauliche strettamente locali, senza considerare la reale variabilità del parametro né tantomeno il modello deposizionale della formazione geologica in esame, particolarmente importante ad esempio negli acquiferi alluvionali. Inoltre da un punto di vista operativo in previsione della fase di calibrazione ([capitolo 10](#)) può essere opportuno individuare aree geologicamente omogenee rispetto al parametro in esame⁴.

Si suggerisce, dunque, per ognuno dei parametri idrogeologici, di procedere come segue:

1. dall'analisi delle prove sperimentali ricavare dati puntuali dei parametri idrogeologici riferiti ai singoli acquiferi;
2. in base all'analisi delle strutture geologiche e idrogeologiche e dei dati stratigrafici individuare aree omogenee dal punto di vista idrogeologico, coerenti con i dati sperimentali disponibili;

⁴ In particolare, operare su aree geologicamente omogenee consente di utilizzare in maniera agevole la metodologia "trial-and-error" in fase di calibrazione del modello.

-
3. per ognuna di tali aree indicare un valore più probabile del parametro in esame ed un *range* di possibili valori (un valore minimo ed un valore massimo).

6.5 Analisi delle mappe piezometriche

I dati relativi alla piezometria e le elaborazioni di mappe piezometriche, insieme alle informazioni sul bilancio idrogeologico del sistema, servono come riferimento per la calibrazione del modello numerico; essi rappresentano il dato sperimentale per la valutazione dei risultati delle simulazioni. Per un corretto sviluppo del modello è dunque fondamentale un'analisi dettagliata di tutte le informazioni relative alla piezometria e alle portate.

L'elaborazione di mappe piezometriche tramite l'interpolazione dei dati puntuali e i problemi connessi meriterebbero un approfondimento specifico che esula dagli scopi di questo manuale. In questa sezione si affronta il problema della rappresentatività delle mappe piezometriche in relazione al modello concettuale di riferimento con lo scopo di verificare qualitativamente la compatibilità del campo di moto interpolato con le informazioni idrogeologiche disponibili. In particolare devono essere analizzati i seguenti aspetti:

- *Rappresentatività temporale della piezometria.* La mappa piezometrica è rappresentativa di una condizione di equilibrio, oppure è rappresentativa di una situazione di non equilibrio, nella quale una parte del bilancio è dovuta ad immagazzinamento/rilascio da parte dell'acquifero? Nel primo caso essa può essere utilizzata come riferimento per la calibrazione di un modello in condizioni stazionarie, mentre nel secondo caso occorrerà simulare tale condizione mediante un modello in condizioni transitorie.
- *Rappresentatività spaziale della piezometria.* È necessario individuare le aree in corrispondenza delle quali non esistono punti di misura: la piezometria su tali aree non potrà, di conseguenza, essere considerata completamente attendibile, poiché frutto di elaborazione non vincolata da dati sperimentali. Il confronto tra risultati del modello e piezometria elaborata sarà valido solo nelle aree in corrispondenza delle quali la piezometria è considerata attendibile.
- *Analisi degli estremi di piezometria (minimi e massimi) rispetto ai termini di sorgente.* Se la condizione di flusso può essere considerata stazionaria, allora tutti i punti di piezometria estremi (minimi o massimi) devono essere giustificati dalla presenza di termini di sorgente non nulli: ad un punto di minimo deve corrispondere un termine di sorgente negativo (termine in estrazione), mentre ad un punto di massimo deve corrispondere un termine di sorgente positivo (termine in immissione). In condizioni stazionarie, infatti, non è fisicamente possibile, né matematicamente giustificabile, che un minimo o un massimo nella piezometria sia determinato esclusivamente da variazioni del campo di conducibilità idraulica. Da un punto di vista modellistico ciò implica che, nel caso di simulazioni in condizioni stazionarie, nelle aree in cui esiste un minimo (massimo) è necessario ipotizzare un termine di sorgente in estrazione (immissione). In condizioni transitorie, invece, la presenza di massimi e minimi può essere riconducibile anche a variazioni locali del termine di immagazzinamento.
- *Analisi dei gradienti idraulici.* In base all'andamento della superficie piezometrica è possibile individuare in ogni punto del dominio la direzione di flusso e il gradiente idraulico. Obiettivo dell'analisi proposta è la verifica della compatibilità dei gradienti idraulici calcolati rispetto alle condizioni al contorno ipotizzate, includendo, tra queste, anche le interazioni con corsi d'acqua superficiali. Tra i diversi elementi di verifica possiamo elencare i seguenti:
 - o Sui tratti di frontiera in corrispondenza dei quali sono state ipotizzate condizioni al contorno di flusso nullo, le curve di livello della piezometria devono essere perpendicolari alla frontiera stessa. Per questo motivo, se le curve di livello si dispongono non perpendicolarmente alla frontiera, è necessario ipotizzare un flusso entrante o uscente dalla frontiera stessa.

- Nelle zone dove si è supposto che il livello idrometrico dei corpi idrici superficiali coincide con il livello piezometrico occorre verificare che le curve equipotenziali si raccordino con continuità con il valore della quota idrometrica.
- Nel caso in cui vengano ipotizzati scambi tra l'acquifero e corpi idrici superficiali occorre verificare che le direzioni di flusso risultanti dalle elaborazioni di mappe piezometriche siano compatibili con le direzioni di flusso ipotizzate nella fase di stima dei termini del bilancio idrogeologico (Par. 6.3)

Qualora la piezometria elaborata non risulti congruente con le ipotesi formulate mediante il modello concettuale, occorre verificare se l'incompatibilità sia dovuta alla scarsità di dati osservati o ad una incoerenza del modello concettuale di riferimento: nel primo caso si escluderanno dall'interpolazione alcuni dei dati osservati, nel secondo occorrerà effettuare una revisione delle ipotesi idrogeologiche.

Se alcuni dati vengono esclusi nell'elaborazione delle mappe piezometriche, perché ritenuti affetti da errori, è necessario, in fase di presentazione dei risultati, indicare chiaramente quali dati non sono stati considerati e giustificare compiutamente le motivazioni di tale esclusione.

In [Figura 14](#) sono mostrate le fasi di lavoro per l'elaborazione di un modello concettuale di riferimento.

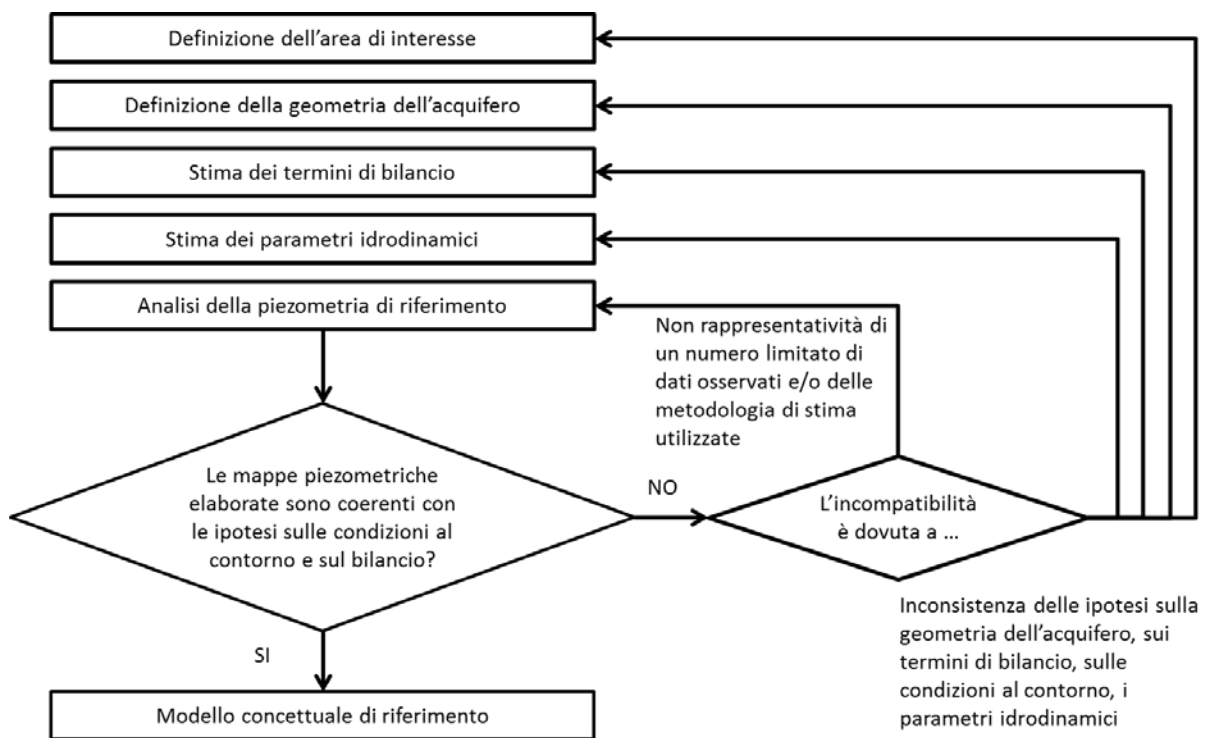


Figura 14. Fasi di lavoro per l'elaborazione di un modello concettuale di riferimento

Riassumendo Fase 3: Elaborazione del modello concettuale di riferimento



- ✓ definizione dell'area di interesse
- ✓ analisi del comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera del volume di interesse
- ✓ geometria del serbatoio, confinamento degli acquiferi
- ✓ bilancio idrogeologico, definizione delle condizioni al contorno
- ✓ stima e distribuzione dei parametri idrogeologici
- ✓ analisi delle mappe piezometriche

Figura 15. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 3 “Elaborazione del modello concettuale di riferimento”.

7 FASE 4 - SCELTA DEL CODICE DI CALCOLO

Obiettivo di questa fase è individuare il codice di calcolo più adatto per la simulazione dei fenomeni individuati in base agli obiettivi del modello.

Per “codice di calcolo” intendiamo sia il codice mediante il quale vengono effettuate le simulazioni, sia gli eventuali software di pre e post processamento. La scelta del codice di calcolo più adatto si basa sulle caratteristiche dell’acquifero in esame e sugli obiettivi dello studio. Inoltre è opportuno considerare la scala spaziale dei fenomeni da modellare e l’eventuale necessità di raffinare la griglia di discretizzazione in aree particolari (ad esempio, nelle vicinanze di un pozzo o di un campo pozzi, nei pressi di una potenziale sorgente di contaminazione, in corrispondenza di irregolarità nella geometria del dominio), distinguendo tra codici che discretizzano le equazioni mediante la tecnica delle differenze finite (tipicamente su una griglia di discretizzazione regolare) o mediante le tecniche degli elementi finiti o dei volumi finiti (che possono lavorare in modo più naturale su griglie irregolari). In generale tutte le tecniche citate permettono di variare la dimensione e forma delle celle all’interno del dominio di flusso in maniera tale da:


- simulare contemporaneamente fenomeni caratterizzati da scale spaziali differenti. Si pensi, ad esempio, alla simulazione del flusso idrico in un bacino caratterizzato da forti scambi tra l’acquifero e corsi d’acqua superficiali: celle di dimensioni ridotte permettono di simulare in maniera più dettagliata tali scambi; viceversa il flusso idrico al di fuori della zona di scambio potrebbe essere simulato in modo accettabile utilizzando celle di dimensioni maggiori;
- definire la griglia di discretizzazione in funzione della densità spaziale dei dati disponibili. Generalmente i dati sperimentali relativi alle variabili di input o di output non presentano infatti la medesima densità spaziale su tutto il dominio. In tal caso potrebbe essere conveniente adeguare la griglia alla densità spaziale dei dati osservati;
- descrivere in maniera soddisfacente la forma dei limiti dell’area in esame, specie nel caso di geometrie complesse (topografia caratterizzata da elevati gradienti, presenza di faglie, ecc).

In alcune particolari situazioni può essere utile applicare modelli di flusso idrico sotterraneo in connessione con altri modelli numerici (ad esempio, modelli che simulano le linee di flusso, il flusso idrico superficiale o l’interazione tra suolo e atmosfera); in questi casi occorre valutare la compatibilità tra i codici da utilizzare, con particolare riferimento ai formati di input e output.

Si suggerisce, inoltre, di valutare la compatibilità dei formati di input/output del codice scelto con il codice utilizzato per la gestione di sistemi informativi territoriali (GIS).

Infine la scelta del codice può essere indirizzata dalla disponibilità del software, dalla preferenza del modellista o dal committente.

Riassumendo Fase 4: Scelta del codice di calcolo



- ✓ scelta condivisa fra modellista e committente
- ✓ analisi della scala spaziale dei fenomeni da modellare
- ✓ compatibilità con eventuali altri strumenti informatici utilizzati (es. GIS)

Figura 16. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 4 “Scelta del codice di calcolo”.

8 FASE 5 - IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Obiettivo primario della fase di implementazione del modello numerico è la trasposizione in termini quantitativi di tutti gli elementi che definiscono il modello concettuale di riferimento. Tale fase può essere articolata nei seguenti punti:

1. definizione del dominio di flusso (Par. 8.1);
2. scelta del regime di flusso (Par. 8.2);
3. definizione dello schema di discretizzazione spaziale (Par. 8.3);
4. definizione dello schema di discretizzazione temporale (Par. 8.4);
5. assegnazione delle condizioni al contorno (Par. 8.5);
6. assegnazione delle condizioni iniziali (Par. 8.6);
7. attribuzione dei valori numerici dei parametri idrogeologici ad ogni elemento che costituisce la discretizzazione del dominio di flusso (Par. 8.7);
8. attribuzione dei valori numerici dei termini di sorgente ad ogni elemento che costituisce la discretizzazione del dominio di flusso (Par. 8.8).

8.1 Definizione del dominio di flusso e relazione del dominio con le condizioni al contorno

La scelta del dominio di flusso, cioè della porzione di spazio oggetto della modellazione numerica, deve essere compiuta in funzione dell'area di interesse dello studio, degli obiettivi del modello e del numero dei dati disponibili e deve tenere conto della posizione dei limiti idrogeologici dell'acquifero.

Distinguiamo due casi:

- A. I limiti dell'area di interesse coincidono con i limiti idrogeologici dell'acquifero.
- B. L'area di interesse si trova all'interno dei limiti idrogeologici dell'acquifero.

Il caso A è più favorevole, dal momento che consente di vincolare il modello mediante condizioni al contorno fisicamente basate. Nel caso B è importante che i limiti del modello siano posti sufficientemente distanti dall'area di interesse; in generale si suggerisce che la distanza tra la frontiera del modello e l'area di interesse sia tale che le altezze piezometriche calcolate in prossimità dei limiti non varino in maniera significativa al variare dei termini di sorgente ubicati all'interno dell'area di interesse stessa.

Sull'assegnazione delle condizioni al contorno si veda il paragrafo 8.5

8.2 Scelta del regime di flusso

La scelta del regime di flusso deve essere compiuta in base: 1) agli obiettivi del modello individuati nel corso della fase 1 ([capitolo 4](#)); 2) alla rappresentatività dei dati osservati rispetto alle condizioni di stazionarietà o transitorietà del processo simulato. È importante sottolineare che è la valutazione sulla condizione di flusso relativa ad un insieme di dati osservati che deve guidare la scelta delle condizioni stazionarie o transitorie del modello. Se, ad esempio, una mappa piezometrica viene assunta come rappresentativa di una condizione di flusso stazionaria, ma nella realtà essa è rappresentativa di una condizione di flusso transitoria, nella quale cioè il bilancio di massa è determinato anche dal termine di immagazzinamento, una tale assunzione può determinare errori significativi nella modellazione e nei risultati finali.

8.3 Definizione dello schema di discretizzazione spaziale

La scelta degli schemi di discretizzazione e la dimensione delle celle del modello è strettamente connessa con la scala caratteristica dei fenomeni che si intendono modellare.

Nel caso più generale di un modello di flusso tridimensionale in condizioni transitorie occorre definire:

- Lo schema di discretizzazione nel piano (x,y) .
- Lo schema di discretizzazione lungo la direzione z .

8.3.1 Schema di discretizzazione nel piano (x,y) .

Possono essere indicati i seguenti criteri generali per la definizione della geometria e delle dimensioni degli elementi di discretizzazione nel piano (x,y) :

- Le dimensioni delle celle non devono essere minori del Volume Elementare Rappresentativo⁵ (*REV*) del mezzo poroso in esame.
- Le dimensioni degli elementi devono essere tali da riprodurre la variabilità spaziale dei termini di sorgente e dei parametri idrogeologici alla scala di lavoro scelta. Ad esempio, se l'obiettivo del modello è lo studio alla scala di sito degli abbassamenti piezometrici indotti dall'attivazione di pozzi di presa, occorre definire una discretizzazione dello spazio tale che in ogni cella sia ubicato al più un punto di captazione, per studiare i singoli coni di emungimento. Viceversa, se si vuole studiare l'impatto di un insieme di pozzi ad una scala di minor dettaglio, diversi pozzi potranno essere rappresentati all'interno di una singola cella come un unico termine di sorgente.
- La dimensione media degli elementi di discretizzazione spaziale deve essere paragonabile alla scala rappresentativa dei dati sperimentali. In generale, infatti, i dati sperimentali (relativi sia alle variabili di input/output che ai parametri idrogeologici) sono rappresentativi di un volume di spazio o di un certo intervallo di tempo. Ad esempio, i valori di trasmissività ricavati da prove di portata sono rappresentativi del volume di mezzo poroso interessato dal cono di emungimento indotto dal pompaggio; su tale volume è sensato definire un elemento di discretizzazione di dimensioni confrontabili. Viceversa introdurre schemi di discretizzazione più raffinati, imponendo il medesimo valore di trasmissività, può portare ad errori perché si introducono informazioni nuove: si impone, cioè, che le caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero siano costanti su ogni elemento di discretizzazione, cosa non necessariamente vera.

8.3.2 Schema di discretizzazione lungo la direzione z .

Se si suppone che esista anche una componente verticale del flusso idrico, è possibile sviluppare due tipi di modelli: modelli quasi 3D e modelli 3D.

Modelli quasi 3D. Si discretizzano separatamente all'interno del sistema livelli "acquiferi" e livelli "acquitardi" e si assume che il flusso idrico avvenga nel piano (x,y) negli acquiferi e lungo z negli acquitardi. È possibile fare tale assunzione nell'ipotesi che l'immagazzinamento negli acquitardi sia trascurabile. Occorre tuttavia sottolineare che questo approccio, benché in molti casi rappresentativo delle condizioni fisiche reali, se da un lato permette un notevole risparmio in termini computazionali, dall'altro considerate le potenze dei processori attualmente disponibili, può considerarsi ormai superato.

Modelli 3D. Il flusso viene calcolato nelle tre direzioni per ogni elemento di discretizzazione, sia negli acquiferi che negli acquitardi. Inoltre, gli acquitardi hanno una loro capacità di immagazzinamento che nel quasi 3D non viene rappresentata.

⁵ Per la definizioni di Volume Elementare Rappresentativo si veda, ad esempio, [Bear \(1979\)](#).

In **Figura 17** sono mostrate le possibili direzioni di flusso negli acquitardi in un modello quasi 3D (frecche rosse) e 3D (frecche blu).

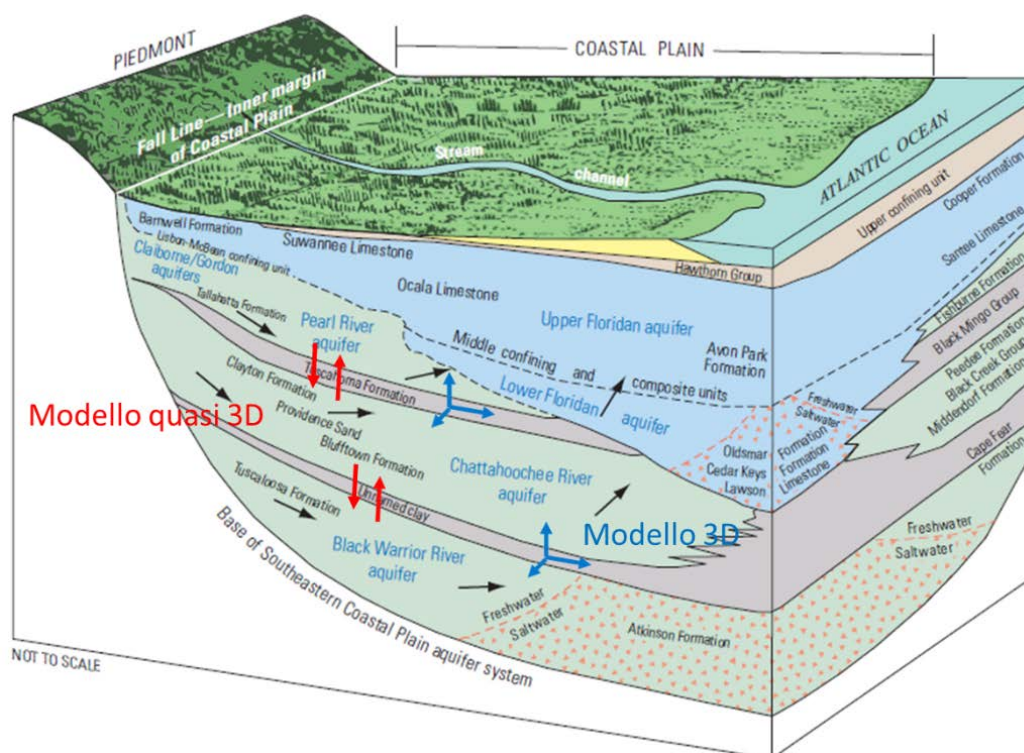


Figura 17. Esempi di schematizzazione del flusso attraverso un acquitardo mediante un modello quasi 3D (frecche rosse) e mediante un modello 3D (frecche blu). Il modello concettuale schematizzato è quello del sistema acquifero della Florida sviluppato dallo U.S. Geological Survey (elaborazione da: <https://fl.water.usgs.gov/floridan/intro.html>).

La discretizzazione lungo la direzione z viene comunemente introdotta mediante la definizione di superfici, continue su tutto il dominio, che definiscono tetto e letto di *livelli (layers)*.

Le superfici che definiscono i layers dovrebbero coincidere al minimo con le superfici che separano gli acquiferi, gli acquitardi e gli acquicludi, definiti secondo il concetto di unità idrogeologica introdotto nel Par. 6.2.

Occorre sottolineare che nel caso in cui si sviluppi un modello *multilayer* è necessario definire, oltre alla geometria, tutti i dati di input (condizioni iniziali, condizioni al contorno e termini di sorgente) e tutti i parametri idrogeologici (conducibilità idraulica, coefficiente di immagazzinamento, porosità efficace, eventuale coefficiente di leakage) per ognuno dei layers.

8.4 Definizione dello schema di discretizzazione temporale

Facendo riferimento alla terminologia abitualmente utilizzata in campo modellistico, distinguiamo nella definizione dello schema di discretizzazione temporale gli “intervalli di sollecitazione” (*stress period, Δs*) e il “passo di discretizzazione” (*time step, Δt*).

Gli intervalli di sollecitazione vengono introdotti al fine di assegnare la variabilità temporale dei termini di sorgente e delle condizioni al contorno: per ogni Δs vengono assegnati valori delle variabili di input costanti in quell’intervallo di tempo.

Il passo di discretizzazione Δt definisce gli istanti temporali in corrispondenza dei quali vengono calcolate le altezze piezometriche. Il Δt scelto deve essere minore del Δs .

Non esiste un criterio univoco per la scelta del passo di discretizzazione temporale. Possono, tuttavia, essere date alcune indicazioni di massima:

- Il passo di discretizzazione temporale deve essere minore dei tempi caratteristici della variabilità temporale del fenomeno modellato. Se, ad esempio, la messa in funzione di un pozzo di emungimento determina abbassamenti dell'altezza freatica che si stabilizzano nell'arco di 1 giorno, è presumibile che $\Delta t \approx 1$ ora possa essere adeguato.
- È possibile verificare a posteriori l'adeguatezza del passo scelto analizzando la piezometria simulata al variare del Δt . In generale, infatti, esiste un valore del passo di discretizzazione, che indicheremo con $\Delta \bar{t}$, per il quale tutte le simulazioni effettuate con $\Delta t < \Delta \bar{t}$ danno approssimativamente gli stessi risultati. Se, dunque, al variare di Δt si ottengono soluzioni molto diverse le une dalle altre è probabile che il passo scelto sia troppo elevato.
- La scelta del passo di discretizzazione temporale non può essere indipendente, per motivi matematici, dal passo di discretizzazione spaziale. Anderson e Woessner (1992) raccomandano un passo di discretizzazione temporale massimo Δt_{max} definito dalla relazione $\Delta t_{max} = s \cdot l^2 / 4T$, dove s è il coefficiente di immagazzinamento, l la dimensione lineare media delle celle e T la trasmissività idraulica.

8.5 Assegnazione delle condizioni al contorno

Mediante l'assegnazione delle condizioni al contorno si traspongono matematicamente le informazioni e le ipotesi sul comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera del dominio di flusso elaborate nell'ambito del modello concettuale di riferimento.

Dal punto di vista matematico, le condizioni al contorno sono l'assegnazione del valore della soluzione di un'equazione differenziale ai margini dell'insieme di definizione di un'equazione differenziale. Nella modellazione matematica dell'equazione della diffusività si usano abitualmente le seguenti condizioni al contorno:

- *Condizioni al contorno di Dirichlet (o di potenziale imposto o del I tipo).* Mediante tali condizioni al contorno viene assegnata l'altezza piezometrica sulla frontiera del dominio. Le condizioni al contorno di Dirichlet modellano una realtà idrogeologica nella quale l'altezza piezometrica in un punto (o in un'area) è indipendente dal valore dei termini di sorgente. È, dunque, una condizione particolarmente vincolante, adatta a simulare il contatto idraulico dell'acquifero con un potenziale fisso quale quello del mare, di un lago o di un fiume il cui livello e la cui portata non siano influenzati da quanto avviene all'interno dell'acquifero. Nel caso in cui si utilizzi il mare come condizione al contorno è generalmente necessario tenere in considerazione la differenza di densità tra le acque sotterranee e le acque marine (box 14 e box 15).

Una condizione al contorno di carico imposto può essere utilizzata anche per modellare una sorgente, a condizione che questa non sia effimera, cioè che la sua quota non sia mai superiore al potenziale dell'acquifero nei dintorni della sorgente stessa, perché in quel caso la sorgente non erogherebbe alcuna portata. Alla scala di sito, condizioni al contorno di Dirichlet devono essere utilizzate con molta attenzione e solo dopo avere verificato che una delle due seguenti condizioni sia verificata: a) i tratti della frontiera sulla quale si vogliono assegnare condizioni di carico imposto coincidono con limiti idrogeologici dell'acquifero costituiti da serbatoi idrici (fiume, lago, ecc.) in contatto idraulico continuo con l'acquifero; b) il potenziale sulla frontiera del dominio non varia al variare del valore dei termini di sorgente: se, ad esempio, si vuole simulare l'abbassamento piezometrico indotto dall'attività di un pozzo (o di un cluster di pozzi) occorre verificare che le condizioni al contorno siano poste ad una distanza sufficiente affinché il cono di emungimento non raggiunga la frontiera stessa. In Figura 18 sono mostrati schematicamente alcuni esempi di condizioni al contorno di I tipo.

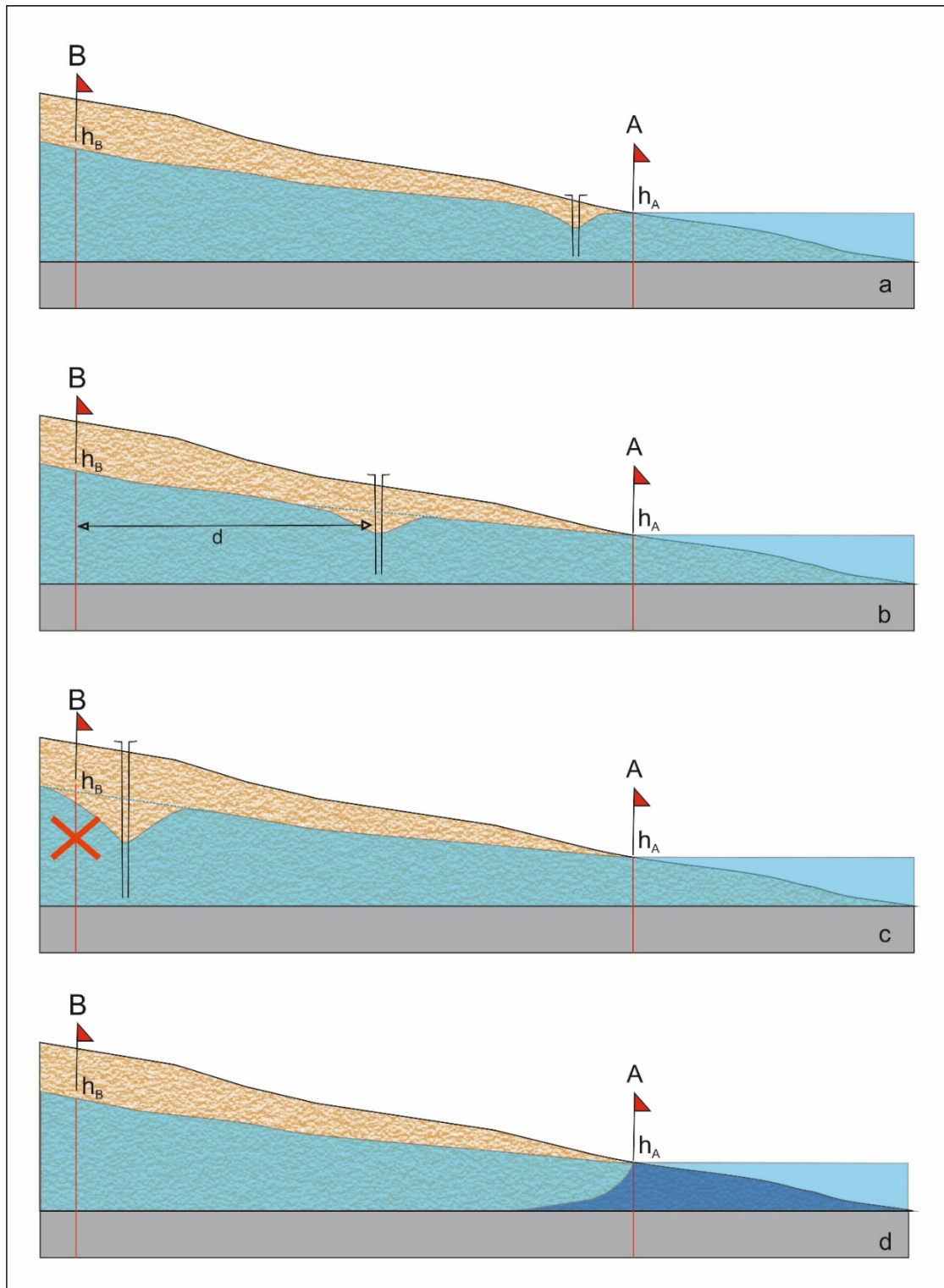


Figura 18. Esempi di condizione al contorno di primo tipo (di Dirichlet o di potenziale imposto): a) corpo idrico superficiale di valle in contatto idraulico perfetto con l'acquifero di interesse la cui quota non varia in funzione delle sollecitazioni (termini di sorgente) e il cui potenziale idraulico coincide all'interfaccia con il potenziale dell'acquifero; b) Questa condizione può essere imposta anche in ingresso al dominio (sez. B) qualora detto margine non risenta delle sollecitazioni interne al dominio stesso (es. eventuali pozzi devono essere sufficientemente lontani da non avere effetti sul livello piezometrico in B). Le condizioni di carico idraulico (fisso o variabile nel tempo) saranno attribuite in funzione delle osservazioni di campo. c) Nel caso in cui le sollecitazioni interne al dominio stesso interferiscano con l'altezza piezometrica in corrispondenza del margine di monte del dominio non è possibile imporre condizioni al contorno di carico imposto in B. d) Nel caso il corpo idraulico superficiale, che definisce il carico imposto di valle, sia costituito da acque marine, l'effetto del cuneo salino intruso sotto le acque dolci sarà più correttamente simulato da modelli densità dipendenti (vedi [box 14](#) e [box 15](#))

- *Condizioni al contorno di Neumann (o di flusso imposto o del secondo tipo)*. Mediante tali condizioni viene assegnato il flusso idrico attraverso la frontiera del dominio, flusso che può essere nullo o diverso da zero. Quest'ultima condizione può essere utilizzata per simulare un flusso entrante dal margine dell'acquifero (ad esempio, dovuto a deflusso superficiale), oppure, nel caso in cui siano disponibili informazioni sul bilancio idrogeologico a monte del dominio, per imporre la portata entrante da monte. Analogamente, qualora siano note le portate tra l'acquifero e l'esterno in corrispondenza di alcuni elementi del dominio (ad esempio portata estratta da un pozzo o da un cluster di pozzi) o di tutto il dominio (ad esempio l'infiltrazione efficace), è possibile imporre la portata entrante/uscente mediante condizioni al contorno del secondo tipo. In [Figura 19](#) sono mostrati schematicamente alcuni esempi di condizioni al contorno di II tipo.

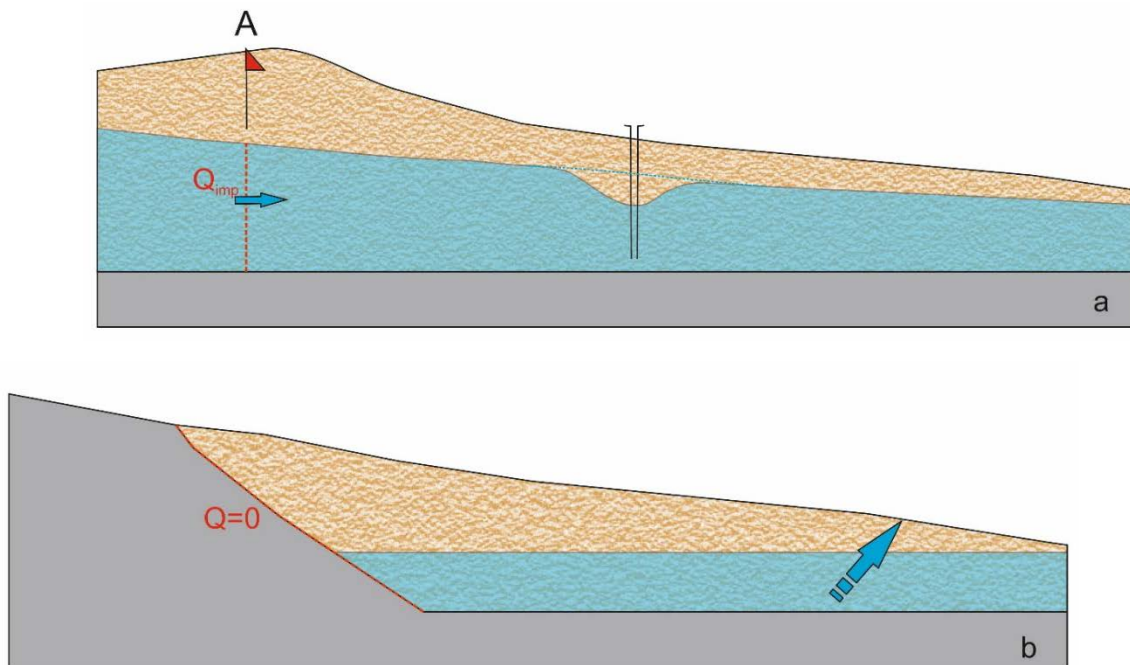


Figura 19. Esempi di condizioni al contorno di secondo tipo. a) flusso entrante da monte sostanzialmente indipendente dalle sollecitazioni interne al dominio. b) Condizione di flusso nullo che si realizza quando il margine del dominio non è attraversato da flusso. Le condizioni di flusso nullo possono derivare da condizioni geologiche (es. presenza di corpi impermeabili) o idrogeologiche (flusso parallelo al margine del dominio). La figura rappresenta una sezione trasversale alla direzione del flusso, ortogonale al foglio.

- *Condizioni al contorno di Cauchy (o di tipo misto o del terzo tipo)*. Imponendo tali condizioni, il flusso idrico entrante/uscente attraverso la frontiera del dominio viene calcolato in funzione dell'altezza piezometrica simulata in corrispondenza della frontiera stessa e di un termine chiamato *conduttanza*, avente le dimensioni di una portata per unità di lunghezza ($L^2 \cdot T^{-1}$). Tali condizioni vengono abitualmente utilizzate: 1) quando la frontiera del modello non corrisponde ai limiti fisici dell'acquifero; 2) per simulare gli scambi tra l'acquifero e un corpo idrico superficiale nel caso in cui l'altezza idrometrica del corpo idrico superficiale non coincida con l'altezza piezometrica (vedi [box 12](#)); 3) per simulare la portata che fluisce verso un dreno. Le condizioni al contorno di tipo misto introducono un elemento di non linearità nel

problema⁶ che può determinare difficoltà di carattere numerico (vedi capitolo 9). In Figura 20 sono mostrati schematicamente alcuni esempi di condizioni a contorno del III tipo.

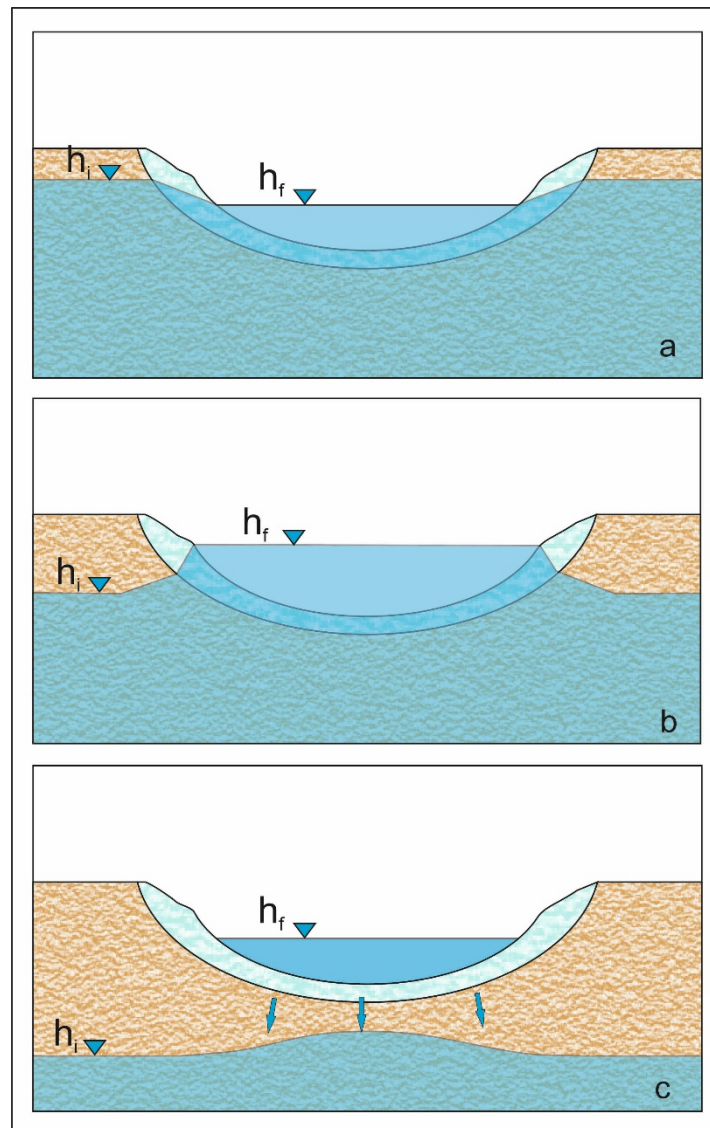


Figura 20. Esempi di condizioni al contorno di terzo tipo: acque superficiali con un letto semi-permeabile. H_i è l'altezza piezometrica della falda [L] - H_f è l'altezza idrometrica del fiume [L]. Nel caso a) è il fiume ad alimentare l'acquifero; nel caso b) è quest'ultimo ad alimentare il corso d'acqua superficiale. Il caso c) prevede uno scambio fiume-falda attraverso uno spessore di terreno insaturo.

⁶ La non linearità del problema è data dal fatto che il valore della portata calcolata attraverso la frontiera del dominio dipende dall'altezza piezometrica calcolata dal modello stesso.

Box 12. Definizione matematica delle condizioni al contorno di tipo misto

La condizione al contorno di Cauchy (o di tipo misto o del terzo tipo) può essere assegnata per simulare l'interazione tra un fiume e l'acquifero (Figura 20) nell'ipotesi che l'altezza idrometrica non coincida con la quota piezometrica. Utilizzando uno schema alle differenze finite, la portata persa dal fiume (o drenata da esso) nella cella i -esima viene calcolata come segue:

$$Q_i = k_i \cdot L_i \cdot W_i \cdot \frac{H_i^f - H_i}{D_i} = C_i \cdot (H_i^f - H_i) \quad (7)$$

dove: Q_i è la portata persa o drenata al fiume nell'elemento i -esimo [$L^3 \cdot T^{-1}$]

k_i è la conducibilità idraulica del materiale che costituisce il letto del fiume nell'elemento i -esimo [$L \cdot T^{-1}$]

L_i è la lunghezza del fiume nell'elemento i -esimo [L]

W_i è la larghezza del fiume nell'elemento i -esimo [L]

H_i è l'altezza piezometrica nell'elemento i -esimo [L]

H_i^f è l'altezza idrometrica del fiume nell'elemento i -esimo [L]

$C_i = \frac{k_i \cdot L_i \cdot W_i}{D_i}$ è la conduttanza nell'elemento i -esimo [$L^2 \cdot T^{-1}$].

Per evitare che, in caso di abbassamento della altezza della falda H_i al di sotto della quota del letto del fiume H_i^b ($H_i^b > H_i$), la portata ceduta da questo verso l'acquifero aumenti a dismisura proporzionalmente alla distanza ($H_i^f - H_i$), è usuale imporre una condizione tale per cui quando $H_i^b > H_i$ la portata ceduta si annulla o si limita a un valore prefissato.

In maniera analoga può essere modellata l'interazione tra l'acquifero e un dreno caratterizzato da un'altezza idrometrica H_i^D . In questo caso il flusso può avvenire solo dall'acquifero al dreno ed è calcolato come:

$$\begin{cases} Q_i = k_i \cdot L_i \cdot W_i \cdot \frac{H_i^D - H_i}{D_i} = C_i \cdot (H_i^D - H_i) & \text{per } H_i^D > H_i \\ Q_i = 0 & \text{per } H_i^D \leq H_i \end{cases} \quad (8)$$

dove: Q_i è la portata che fluisce nel dreno nell'elemento i -esimo [$L^3 \cdot T^{-1}$]

k_i è la conducibilità idraulica del dreno nell'elemento i -esimo [$L \cdot T^{-1}$]

L_i è la lunghezza del dreno nell'elemento i -esimo [L]

W_i è la larghezza del dreno nell'elemento i -esimo [L]

H_i è l'altezza piezometrica nell'elemento i -esimo [L]

H_i^D è l'altezza idrometrica del dreno nell'elemento i -esimo [L]

$C_i = \frac{k_i \cdot L_i \cdot W_i}{D_i}$ è la conduttanza nell'elemento i -esimo. [$L^2 \cdot T^{-1}$]

Condizioni al contorno di Cauchy possono essere utilizzate anche per vincolare il modello mediante condizioni al contorno distanti dall'area di interesse, senza necessariamente estendere il dominio di flusso. Se, ad esempio, si conosce l'altezza piezometrica ad una certa distanza dal limite del dominio di flusso e si ipotizza che tale altezza non vari al variare dei termini di sorgente assegnati all'interno del dominio stesso, è possibile simulare tale situazione imponendo condizioni al contorno di Cauchy definite come segue:

$$Q_i = k_i \cdot S_i \cdot \Delta x \cdot \frac{H_c - h_i}{D} = C_i \cdot (H_c - h_i) \quad (9)$$

dove: Q_i è la portata entrante (o uscente) attraverso la frontiera nella cella i -esima. Il flusso calcolato è orizzontale. [$L^3 \cdot T^{-1}$]

k_i è la conducibilità idraulica nell'elemento i -esimo [$L \cdot T^{-1}$]

Δx è la dimensione della maglia lungo la direzione x [L]

D_i è lo spessore saturo nell'elemento i -esimo [L]

h_i è l'altezza piezometrica nell'elemento i -esimo [L]

H_c è l'altezza piezometrica imposta ad una distanza D nell'elemento i -esimo [L]

$C_i = \frac{k_i S_i \Delta x}{D}$ è la conduttanza nell'elemento i -esimo [$L^2 \cdot T^{-1}$]

Tali condizioni al contorno risultano molto utili nell'implementazione di modelli a scala di sito, in particolar modo quando non sia possibile definire la frontiera del dominio di flusso in corrispondenza dei limiti idrogeologici dell'acquifero.

In [Tabella 8](#) in via esemplificativa sono elencate le tipologie di condizioni al contorno da adottare in funzione dello scenario idrogeologico del sito.

Tabella 8. Individuazione delle principali condizioni al contorno di I, II, III tipo da selezionare in relazione allo scenario idrogeologico del sito.

SCENARIO IDROGEOLOGICO	CONDIZIONE AL CONTORNO
Corpi idrici superficiali (grandi fiumi, laghi, mare) in contatto idraulico perfetto con il corpo idrico sotterraneo le cui quote non variano in funzione delle sollecitazioni (termini di sorgente) cui l'acquifero può essere sottoposto	I Tipo - Carico Imposto (Altezza piezometrica Assegnata)
Contatti con unità geologiche caratterizzate da bassa conducibilità idraulica	II Tipo - Assenza di flusso
Spartiacque sotterranei	II tipo – Flusso Imposto
Aree di infiltrazione e ricarica degli acquiferi	II tipo – Flusso Imposto
Linee di flusso parallele ai margini di dominio	II tipo – Flusso imposto (nullo)
Pozzi d'emungimento (campo pozzi, pozzi barriera)	II tipo – Flusso Imposto
Dreni	III Tipo - Misto
Corpi idrici superficiali in contatto idraulico con l'acquifero la cui portata di scambio dipende dall'altezza idrometrica del corpo idrico stesso (assegnata) e dall'altezza piezometrica (incognita)	III Tipo - Misto
Margini del dominio di flusso in corrispondenza dei quali la portata in ingresso/uscita dipende dall'altezza piezometrica assegnata in un punto esterno al dominio ubicato ad una distanza L dal margine stesso e dalla altezza piezometrica (incognita)	III Tipo - Misto

Nelle seguenti figure ([Figura 21](#), [Figura 22](#) e [Figura 23](#)) sono stati esemplificati alcuni esempi su come impostare il dominio in un modello di flusso e su come assegnare alcune condizioni al contorno.

Si evidenzia che, in considerazione delle molteplici possibilità interpretative che possono essere assegnate nell'ambito delle scelte modellistiche, gli esempi che seguono hanno un carattere puramente indicativo.

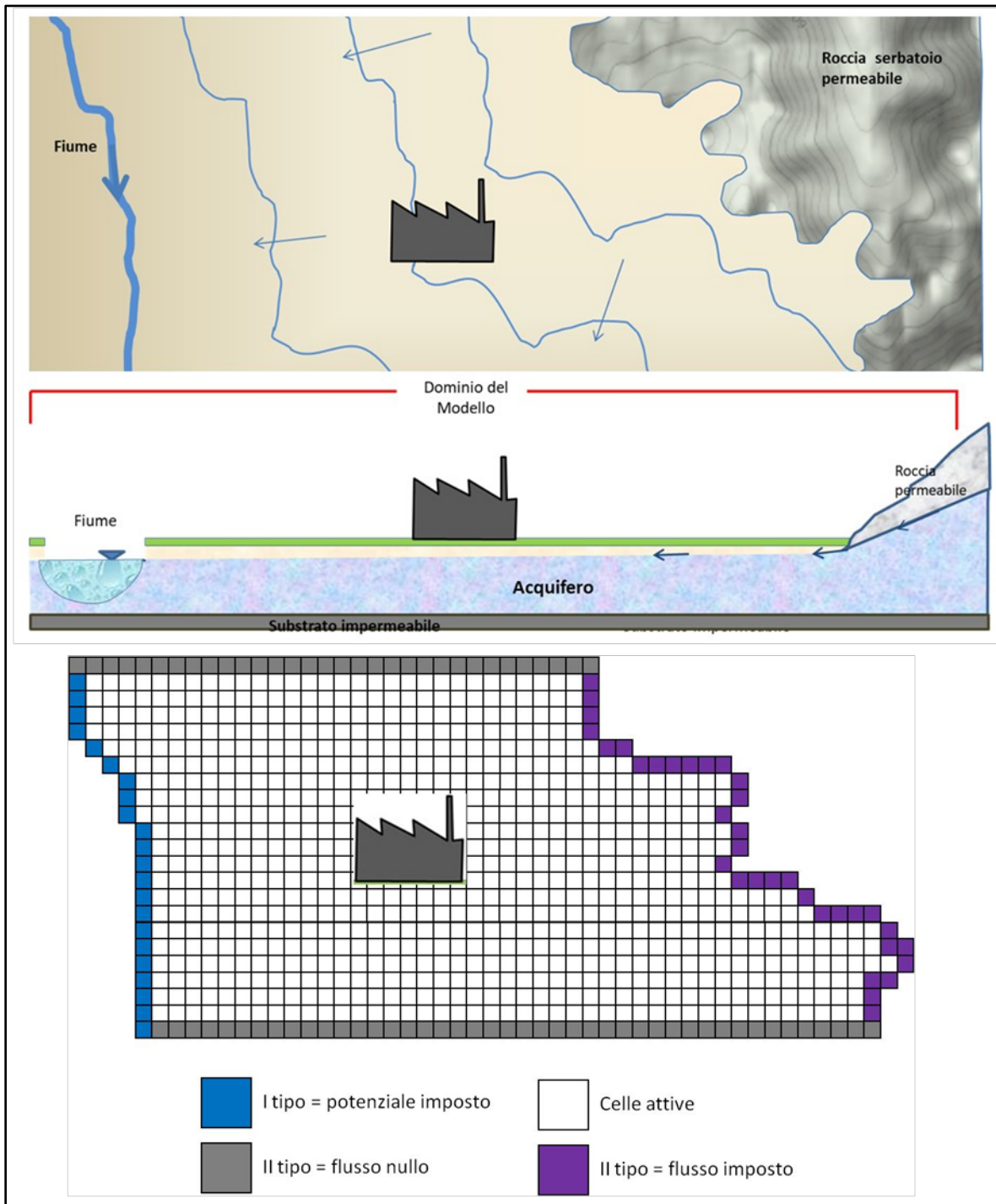


Figura 21. Esempio di impostazione della modellazione idrogeologica per un'area caratterizzata da diverse tipologie di condizioni al contorno; le assunzioni scelte hanno carattere esemplificativo e non vincolante. Flusso imposto a monte idrogeologico ove è presente una portata alimentante l'area del modello; potenziale imposto a valle idrogeologico per la presenza di un corpo idrico superficiale (es. fiume) che interagisce con l'acquifero oggetto dello studio; il limite nord ed il limite sud del modello di II tipo (flusso nullo) in quanto il flusso idrico è considerato parallelo rispetto ai limiti del dominio.

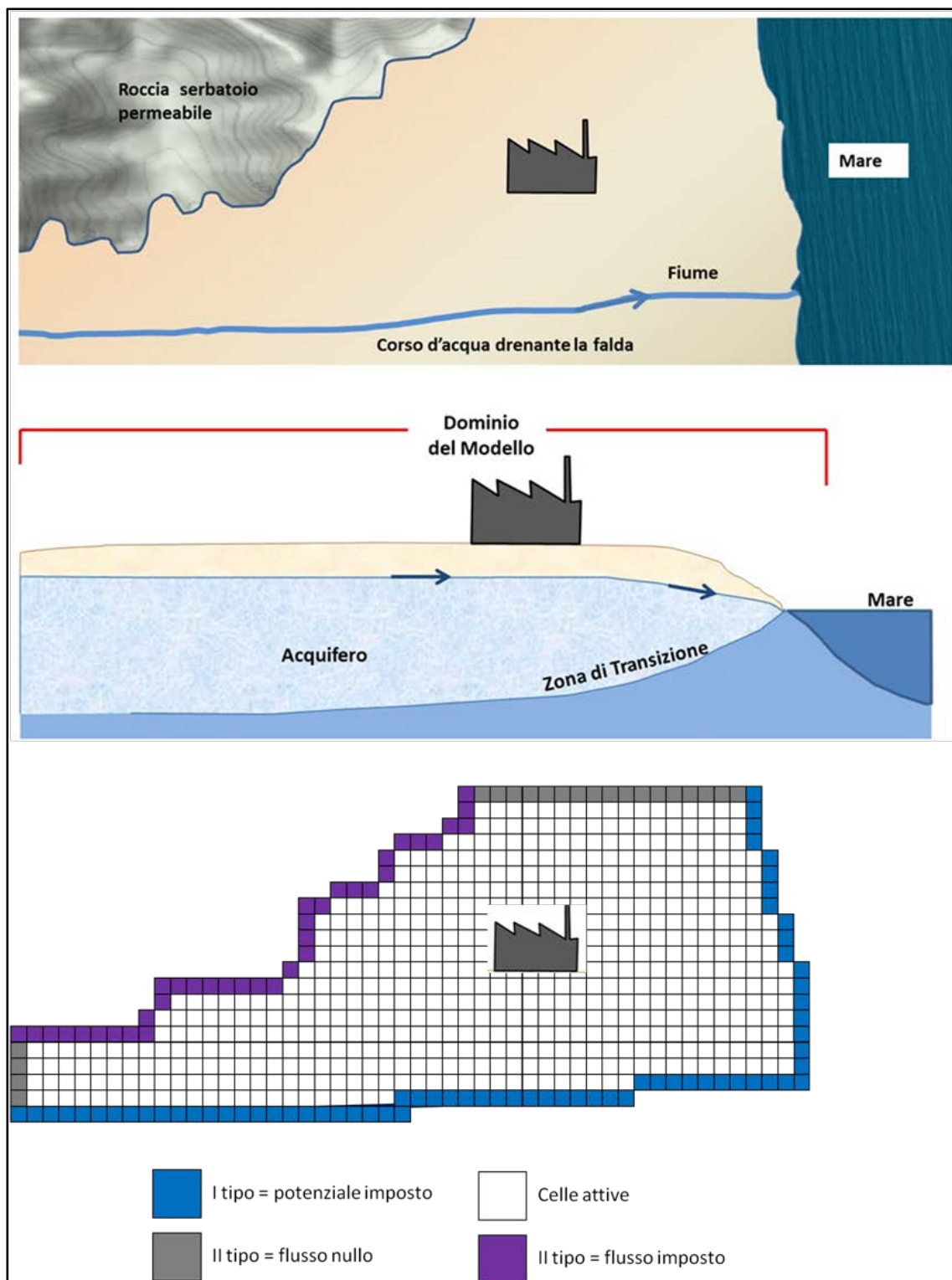


Figura 22. Esempio di impostazione della modellizzazione idrogeologica per un'area caratterizzata da diverse tipologie di condizioni al contorno; le assunzioni scelte hanno carattere esemplificativo e non vincolante. Flusso imposto a monte idrogeologico ove è presente una portata alimentante l'area del modello derivante, per esempio, da un acquifero carsico; limite a potenziale imposto a valle idrogeologico per la presenza del mare che interagisce con l'acquifero oggetto dello studio (a tal proposito si osservi che tale scelta costituisce una semplificazione in quanto la presenza del cuneo salino e della zona di transizione richiederebbero una modellazione più complessa a densità dipendente); si assume assenza di flusso nelle celle con condizioni del II tipo sul margine sinistro in quanto si presume un flusso prevalente fra la roccia serbatoio permeabile ed il fiume e pertanto la componente che attraversa il limite del dominio è trascurabile. Analogamente per le celle grigie a nord si suppone un flusso parallelo al confine del dominio; a potenziale imposto ove è presente un corpo idrico drenante l'acquifero oggetto dello studio, assumendo che quest'ultimo non vari la sua quota in funzione delle sollecitazioni (termini di sorgente).

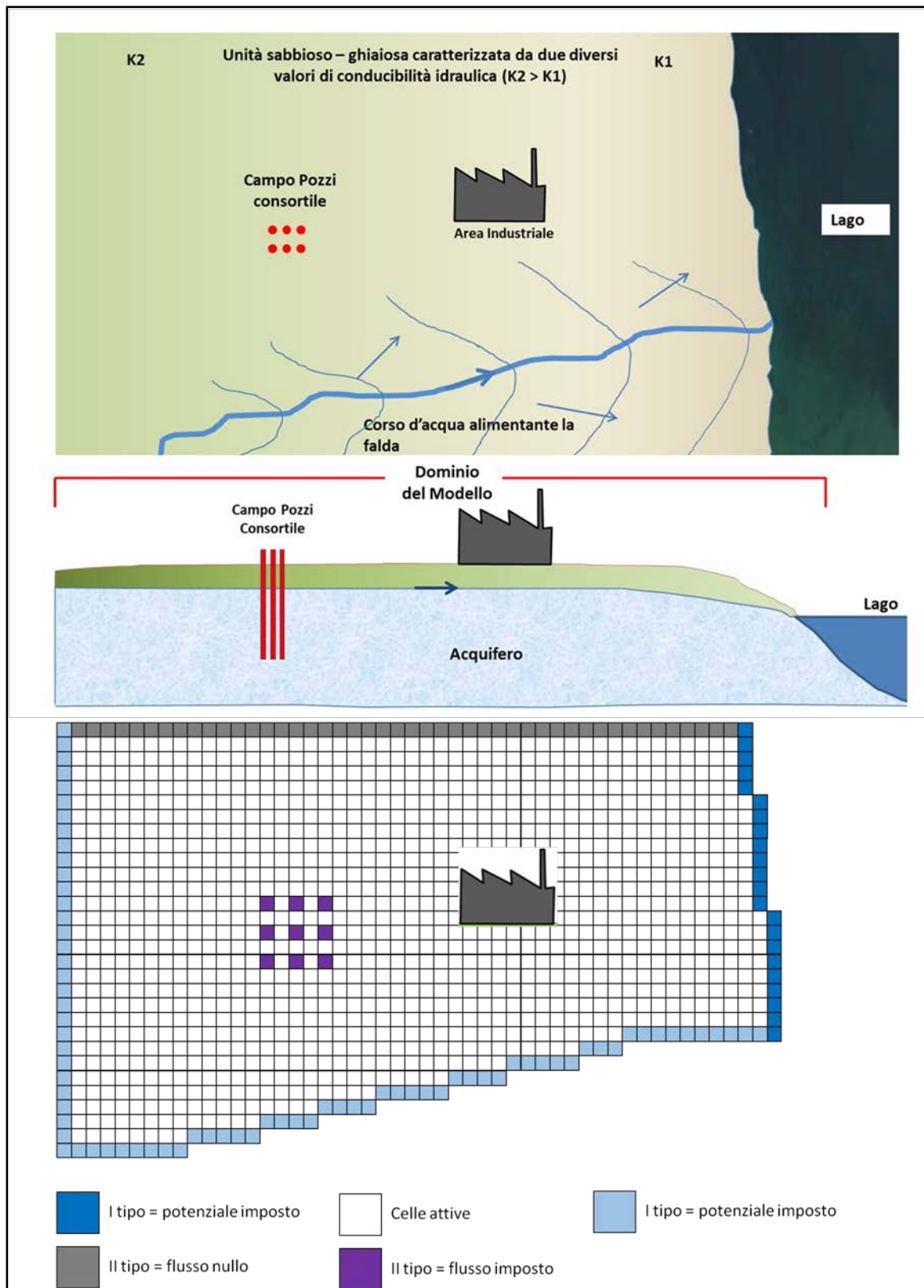


Figura 23. Esempio di impostazione della modellizzazione idrogeologica per un'area caratterizzata da diverse tipologie di condizioni al contorno; le assunzioni scelte hanno carattere esemplificativo e non vincolante: a potenziale imposto a valle idrogeologico per la presenza di un lago che interagisce con l'acquifero oggetto dello studio; a flusso nullo perché si assume che il flusso è parallelo ai confini del dominio del modello; III tipo (misto) in quanto lo scambio fiume-falda è più articolato in funzione delle variazioni reciproche dei livelli falda-fiume. NB: nel caso in esame, fra i parametri in input da considerare, vi sarà anche la differenza di conducibilità idraulica nelle diverse parti del dominio.

Nel [box13](#) è descritto un esempio di assegnazione delle condizioni al contorno.

Box 13. Esempio di assegnazione delle condizioni al contorno: l'acquifero di fondovalle alluvionale del torrente Agno (Monti Lessini)

In questa sezione viene descritta l'implementazione delle condizioni al contorno (boundary conditions) in un modello numerico ad elementi finiti (FEM) di una area di fondovalle alluvionale del torrente Agno nei Monti Lessini orientali in Provincia di Vicenza.

La definizione dei limiti del modello e delle diverse condizioni al contorno da assegnare è avvenuta sulla base degli elementi idrogeologici individuati nel modello concettuale.

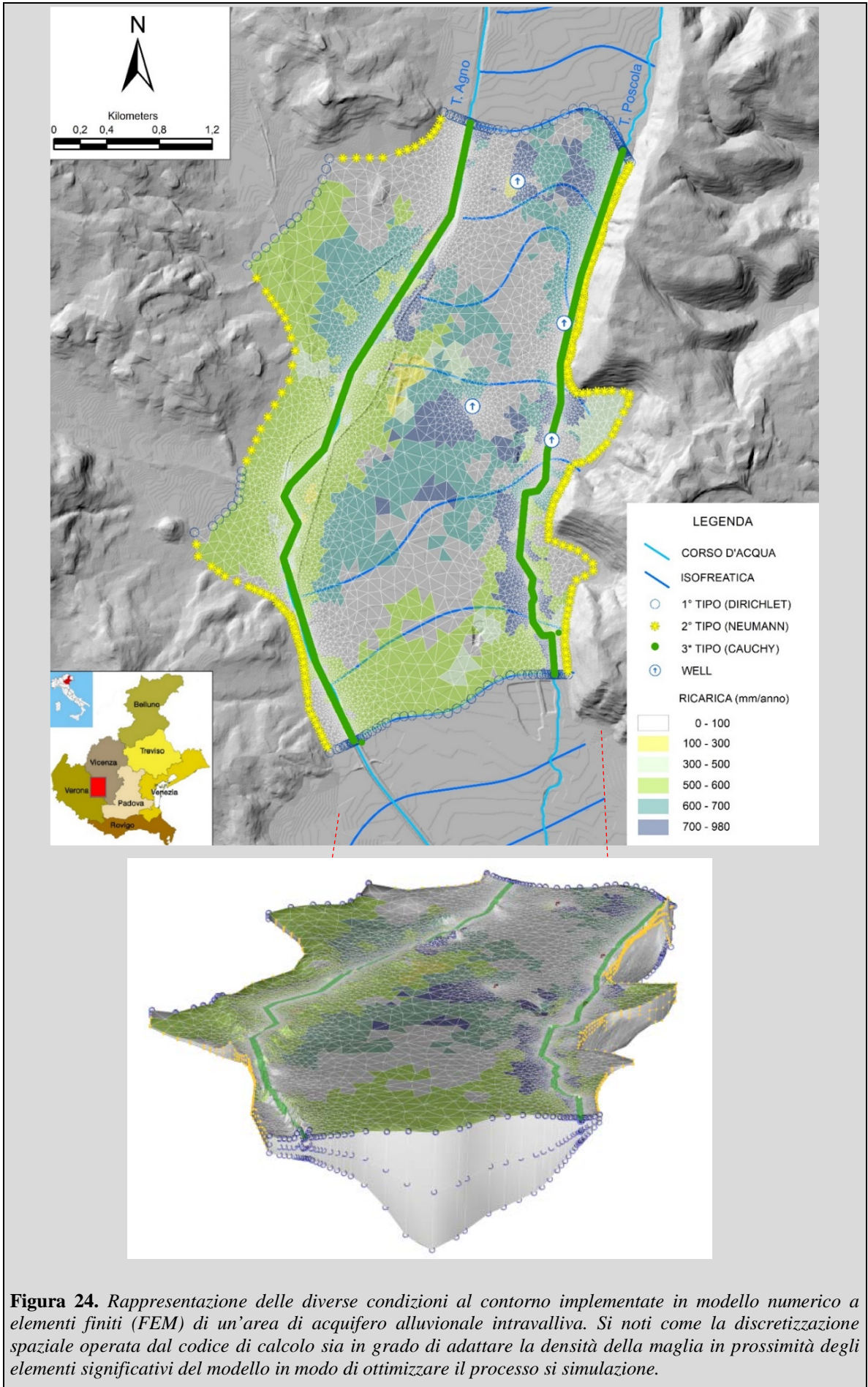
In particolare le condizioni di primo tipo, o di Dirichlet ovvero di carico idraulico imposto, sono state implementate nei limiti nord e sud del modello, in corrispondenza delle isofreatiche rappresentative del carico idraulico locale per simulare rispettivamente i flussi in entrata (in-flow) e in uscita (out-flow) dall'acquifero alluvionale. Tale scelta sott'intende implicitamente l'assunzione che le altezze piezometriche in corrispondenza dei margini di monte e di valle del dominio di flusso siano indipendenti dal valore delle forzanti (termini di sorgente) all'interno del dominio stesso. Il valore impostato è stato di 105 m s.l.m. per il limite nord e di 70 m s.l.m. per il limite sud con un gradiente idraulico di circa l'8 per mille. Con la stessa modalità sono state inserite, per simulare i flussi in entrata al dominio, le condizioni al contorno delle due valli laterali ad ovest.

Sui limiti orientali e occidentali del modello, in corrispondenza dell'interfaccia di separazione tra l'acquifero alluvionale e le formazioni rocciose dei versanti esterne al modello è stata imposta una condizione di Neumann, con flusso assegnato pari a zero. Le osservazioni quantitative condotte hanno mostrato lungo questi tratti di limite, uno scambio idrico trascurabile rispetto al flusso freatico principale dell'acquifero alluvionale

L'azione di ricarica operata dai torrenti attraverso processi di dispersione è stata implementata con l'assegnazione delle condizioni di terzo tipo o di Cauchy nelle celle sottese dall'alveo dei torrenti. I valori rappresentativi di queste condizioni al contorno variano a seconda del tratto di torrente considerato da 109 l/(s·km) a 390 l/(s·km) circa per il torrente Agno e 10 l/(s·km) circa per l'intero tratto del torrente Poscola per una portata dispersa complessiva di 0.816 m³/s. Tali valori, sono stati ricavati con apposite misure di portata differenziali.

La stima della ricarica distribuita generata dalle precipitazioni è stata ottenuta con il calcolo del coefficiente di infiltrazione efficace elaborato con il metodo di Kennesey (1930; si veda, da esempio, l'applicazione del metodo in [Barazzuoli et al. 1989](#)). Il metodo calcola il coefficiente di deflusso come somma di 3 componenti: permeabilità del suolo, acclività e copertura vegetale. A completare questa voce sono stati infine aggiunti i contributi dell'irrigazione annua pari a 210 mm/anno nelle aree irrigate ad aspersione e 630 mm/anno per quelle a scorrimento. L'infiltrazione efficace così calcolata varia da 0 (in corrispondenza delle aree urbanizzate completamente impermeabilizzate) a valori massimi di 980 mm annui in corrispondenza di terreni molto permeabili e irrigati a scorrimento.

L'implementazione delle condizioni al contorno nel dominio di simulazione si è conclusa con l'inserimento delle portate emunte tramite i pozzi (4 punti di captazione per un totale di 0.120 m³/s) presenti nell'area. Per l'obiettivo specifico della simulazione, sono state implementati solo i pozzi con portate e regimi di prelievo in grado di modificare in modo significativo il flusso sotterraneo.



Nel caso in cui il dominio del modello interessi acquiferi costieri per i quali occorre considerare la presenza di un cuneo salino (intrusione dell'acqua salata con densità più elevata, sotto l'acqua dolce a minore densità) sarà opportuno utilizzare una modellazione del flusso a densità variabile (box 14).

Box 14 - Soluzione dell'equazione di flusso nel caso di fluidi a densità variabile

L'equazione di Darcy mantiene la sua validità anche considerando il fluido a densità variabile. Tuttavia, nella valutazione della componente z della portata specifica occorre tenere conto del fatto che la densità del fluido ρ varia nel tempo e nello spazio. In un acquifero costiero, ad esempio, in prossimità della linea di costa le acque dolci dell'acquifero si mischiano con le acque salate del mare e, di conseguenza, la densità del fluido varia in relazione alla concentrazione di sali disciolti:

$$\begin{cases} q_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \\ q_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \\ q_z = -\frac{k_z}{\mu} \left[\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \right] \end{cases} \quad (10)$$

dove: $q_x(x, y, z, t)$, $q_y(x, y, z, t)$, $q_z(x, y, z, t)$ = portata specifica nelle direzioni x , y , z [$L \cdot T^{-1}$]

μ = viscosità dinamica del fluido [L^2]

$k(x, y, z, t)$, $k_y(x, y, z, t)$, $k_z(x, y, z, t)$ = permeabilità intrinseche nelle direzioni x , y , z [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$]

$P(x, y, z, t)$ = pressione [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]

$\rho(x, y, z, t)$ = densità del fluido [$M \cdot L^{-3}$]

g = accelerazione di gravità [$L \cdot T^{-2}$]

Sostituendo l'equazione di Darcy (10) all'interno dell'equazione di conservazione della massa si ottiene:

$$-\left[\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial(n \cdot \rho)}{\partial t} + Q \quad (11)$$

dove $n(x, y, z)$ è la porosità del mezzo nel punto (x, y, z) e $Q(x, y, z, t)$ il termine di sorgente nel punto (x, y, z) e al tempo t .

Il punto fondamentale è che nell'equazione di flusso a densità variabile il gradiente del potenziale idraulico può dipendere anche dalla variabilità della concentrazione di soluto, la quale a sua volta dipende anche da processi diffusivi, dispersivi, ecc. È quindi necessario, in questo caso, simulare contemporaneamente processi di flusso e processi di trasporto mediante equazioni che considerano la variabilità nello spazio e nel tempo della densità.

Box 15. Esempio di modellazione del flusso a densità variabile.

Come descritto nel capitolo 2, in generale il potenziale idraulico è somma del potenziale gravitazionale e del potenziale di pressione ed è definito come $h = z + p/(\rho \cdot g)$, dove p è la pressione dell'acqua, ρ la sua densità e g l'accelerazione di gravità.

Nel caso di acquiferi costieri, in prossimità della linea di costa la falda e il mare si trovano in contatto idraulico attraverso un'interfaccia, la cui posizione è determinata anche dalla differenza di densità tra le due acque. I due corpi idrici infatti sono caratterizzati da densità differenti, a causa della diversa concentrazione dei sali disciolti (circa 1025 kg/m^3 per l'acqua di mare, 1000 kg/m^3 per l'acqua dolce alla temperatura di $4 \text{ }^\circ\text{C}$). Il gradiente di diffusione all'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata determina fenomeni di trasporto dei sali disciolti e, di conseguenza, una variazione della concentrazione dell'acqua di falda in prossimità della interfaccia. A sua volta tale variazione della concentrazione determina una variazione della densità dell'acqua che non può più essere considerata costante: il potenziale idraulico dipenderà anche dalla densità dell'acqua.

Le approssimazioni introdotte in termini di altezza piezometrica simulata qualora non si consideri la variabilità della densità possono essere, in prossimità della costa, particolarmente significative, come mostrato dall'esempio seguente.

Consideriamo il dominio di flusso mostrato in Figura 25 mediante il quale viene schematizzato un acquifero costiero il cui fondo è posto alla quota di -40 m s.l.m. e il tetto alla quota di 5 m s.l.m. . Il dominio spaziale è discretizzato sul piano (x,y) mediante celle rettangolari di lato $\Delta y = 10 \text{ m}$ e $\Delta x = 50 \text{ m}$ e lungo la verticale mediante quattro layers piani paralleli di spessore pari a 10 m (L2, L3 e L4) e 15 m (L1). La conducibilità idraulica k è posta pari a 10^{-3} m/s e la dispersività (parametro che descrive la dispersione del plume nelle direzioni longitudinale e trasversale al flusso) pari a 50 m e 5 m , rispettivamente.

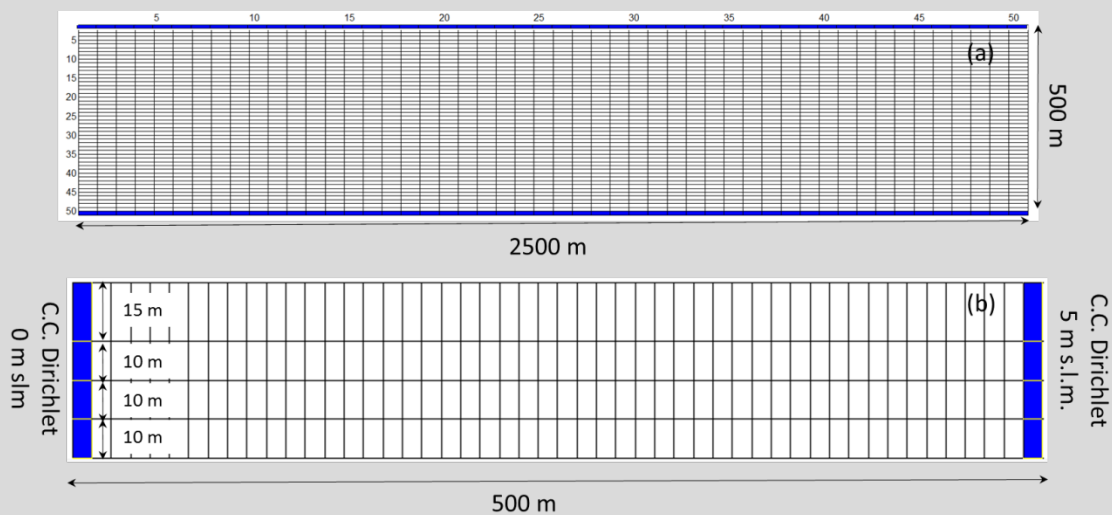


Figura 25. Discretizzazione del dominio spaziale nel piano (x,y) (pannello a) e lungo z (pannello b).

La condizione al contorno di monte è simulata mediante condizioni di Dirichlet pari a 2 m s.l.m. ; la condizione al contorno di valle (linea di costa) è simulata mediante condizioni di Dirichlet pari a 0 m s.l.m. e concentrazione costante pari a 35 g/kg .

In Figura 26 sono mostrati i campi piezometrici (isolinee) e di concentrazione (mediante codice colore) calcolati con un modello di flusso a densità costante (pannello a) e variabile (pannelli b e c per layer 1 e layer 4, rispettivamente). In Figura 27 sono mostrate lungo una sezione parallela alla direzione di flusso le altezze piezometriche e le concentrazioni calcolate mediante un modello di flusso a densità costante e variabile.

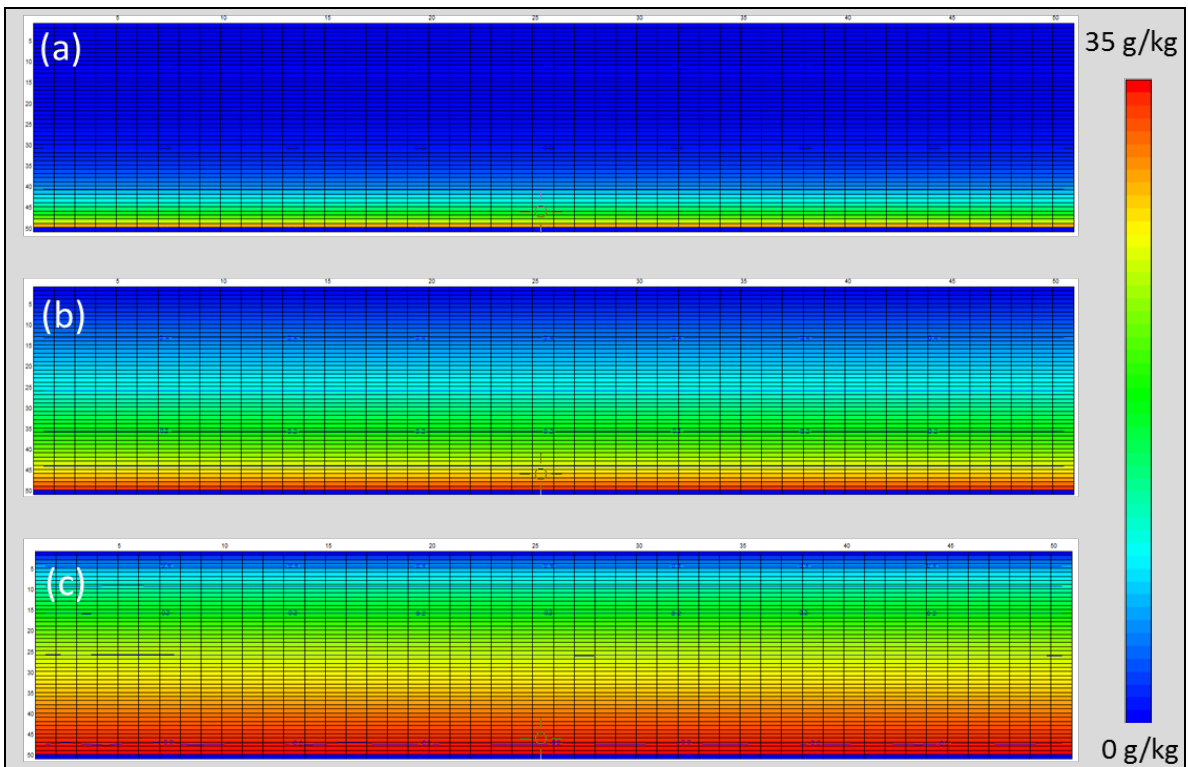


Figura 26. Campi piezometrici (isoline) e di concentrazione (codice colore) calcolati con un modello di flusso a densità costante (pannello a) e variabile (pannelli b e c per layer 1 e layer 4, rispettivamente)

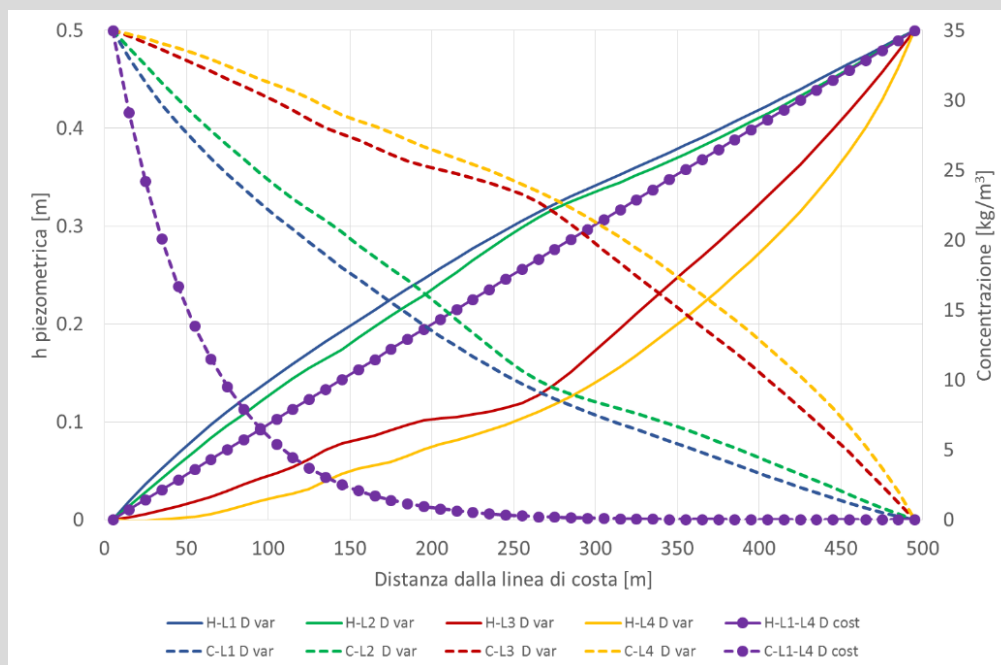


Figura 27. Altezze piezometriche calcolate mediante un modello di flusso a densità costante (H-L1-L4 D cost) e corrispondenti concentrazioni (C-L1-L4 D cost). Altezze piezometriche calcolate mediante un modello di flusso a densità variabile (H-L1 D var, H-L2 D var, H-L3 D var, H-L4 D var) e corrispondenti concentrazioni (C-L1 D var, C-L2 D var, C-L3 D var, C-L4 D var).

Come si evince dalla [Figura 26](#) e [Figura 27](#), nel caso di modellazione del flusso a densità costante, la componente verticale del gradiente idraulico è nulla (le altezze piezometriche calcolate per i quattro layers sono identiche) e l'ingressione marina si estende fino a circa 200 m dalla linea di costa. Viceversa, nel caso di modellazione del flusso a densità variabile, si osserva ingressione

marina fino a quasi 500 m dalla linea di costa, gli strati più profondi sono caratterizzati da una concentrazione più elevata che determina un gradiente idraulico verticale non nullo e una significativa differenza nella posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata (o, meglio, nella posizione della zona di transizione acqua dolce-acqua salata).

8.6 Assegnazione delle condizioni iniziali

Nel caso in cui si sviluppi un modello in regime transitorio è necessario assegnare la condizione iniziale, cioè il valore del campo piezometrico a partire dal quale si vuole simulare l'evoluzione temporale.

In generale è preferibile utilizzare come condizione iniziale la soluzione di un problema in condizioni stazionarie, poiché un campo piezometrico ottenuto da un modello *steady-state* è rappresentativo di una situazione di equilibrio: di conseguenza qualsiasi variazione calcolata dal modello in condizioni transitorie a partire da tale condizione iniziale è attribuibile esclusivamente ad una variazione dei termini di sorgente e/o delle condizioni al contorno.

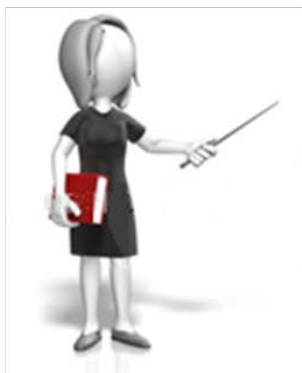
8.7 Attribuzione dei valori numerici dei parametri idrogeologici

La modalità con cui viene stimata la distribuzione dei parametri idrogeologici è stata descritta nel Par. 6.4. Le ipotesi sulla distribuzione spaziale e sul valore dei parametri formulate nella fase di elaborazione del modello concettuale devono essere implementate nel modello assegnando ad ogni elemento della discretizzazione un valore numerico.

8.8 Attribuzione dei valori numerici dei termini di sorgente

La modalità con cui viene stimata la distribuzione dei termini di sorgente, che derivano dal bilancio idrogeologico, è stata descritta nel paragrafo 6.3. Le ipotesi sulla distribuzione spaziale e sul valore dei termini di sorgente formulate nella fase di elaborazione del modello concettuale devono essere implementate nel modello assegnando ad ogni elemento della discretizzazione un valore numerico.

Riassumendo Fase 5: Implementazione del modello numerico



- ✓ definizione del dominio spaziale e temporale
- ✓ discretizzazione del dominio spaziale e temporale
- ✓ definizione dei dati di input del modello (condizioni al contorno, parametri fenomenologici, termini di sorgente, eventuali condizioni iniziali (regime transitorio))
- ✓ implementazione del modello all'interno del codice di calcolo scelto (creazione dei file necessari per la fase di calcolo)

Figura 28. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 5 "Implementazione del modello numerico"

9 FASE 6 - FASE DI CALCOLO

L'attenzione principale in questa fase deve esser posta nell'analisi dei problemi legati alla risoluzione numerica dell'equazione di flusso nelle condizioni imposte nella fase di implementazione del modello.

In un approccio di tipo numerico, il risultato di una simulazione è dato dalla soluzione di un sistema algebrico di equazioni, eventualmente non lineari.

Esistono due tipi di errori connessi con l'utilizzo di tecniche numeriche: errori di *approssimazione* o *troncamento*, legati alla procedura utilizzata per approssimare gli operatori differenziali che compaiono nell'equazione di flusso (differenze finite o elementi finti), e gli errori *numerici* o di *arrotondamento*, legati alla soluzione numerica del sistema algebrico (si veda, per esempio, [Comincioli, 1990](#)). Tale soluzione è di solito ottenuta mediante tecniche di tipo iterativo a partire da una distribuzione iniziale provvisoria delle altezze piezometriche detta *distribuzione di inizializzazione* (o *altezze di inizializzazione*): la soluzione viene iterativamente modificata mediante opportuni fattori di correzione fino a quando la differenza tra due soluzioni successive non risulti minore di un certo valore di *tolleranza* definito a priori; quando tale condizione è verificata si dice che è stata ottenuta la *convergenza*. Tuttavia l'esistenza e l'unicità di una soluzione (e dunque l'esistenza e l'unicità di un campo piezometrico simulato) non sono sempre garantite: esistono cioè classi di problemi numerici corrispondenti a particolari situazioni idrogeologiche per le quali:

- La soluzione non esiste.
- La soluzione esiste, ma il procedimento iterativo non arriva a convergenza.
- Il procedimento iterativo arriva a convergenza, ma le altezze piezometriche trovate non sono soluzione del problema impostato.

Da un punto di vista operativo le tre osservazioni precedenti possono essere così espresse:

- La non convergenza del processo iterativo non implica che una soluzione non esista.
- La convergenza del processo iterativo non implica né l'esistenza, né l'unicità né la correttezza idrogeologica della soluzione.

In generale, i problemi di carattere numerico sono legati alla non linearità del problema; senza entrare in questioni di carattere matematico, si ha non linearità nell'equazione di flusso quando i parametri idrogeologici, le condizioni al contorno o i termini di sorgente dipendono dalle altezze piezometriche, cioè dalla soluzione stessa del problema: l'input dipende anche dall'output.

Possiamo elencare, fra gli altri, i seguenti elementi la cui definizione dipende dall'altezza piezometrica e che dunque introducono elementi di non linearità nelle equazioni di flusso legati ad esempio a:

- Il parametro trasmissività in un acquifero freatico. Ricordiamo che per un acquifero omogeneo $T = k \cdot b$, dove b è lo spessore dell'acquifero e k la conducibilità idraulica orizzontale. Nel caso di un acquifero freatico, tale spessore è dato dalla differenza tra l'altezza piezometrica h e la quota del fondo dell'acquifero. Di conseguenza T è funzione anche di h e quindi della soluzione stessa.
- Condizioni al contorno del III tipo (utilizzate per simulare flussi al contorno, interazioni falda-fiume, eccetera 8.5). In questo tipo di condizioni al contorno la portata entrante o uscente dipende anche dall'altezza piezometrica calcolata sulle celle della frontiera sulle quali le condizioni citate sono state imposte e quindi dalla soluzione stessa.
- Situazione di "cella secca" (*dry cell*) in un acquifero non imprigionato, raggiunta quando la quota dell'altezza piezometrica calcolata è uguale o minore della quota del letto del livello acquifero cui si riferisce.
- Flusso a densità variabile, ad esempio nella simulazione di acquiferi costieri ([box 14](#) e [box 15](#)).

Un altro aspetto da tenere in considerazione e che potrebbe determinare problemi di carattere numerico è legato alla scelta della griglia di discretizzazione. Infatti l'uso di una griglia irregolare, ma anche di una griglia regolare con celle che abbiano un "aspect ratio" (rapporto tra lunghezza massima

e minima dei lati della cella) grande, può porre dei problemi nella soluzione numerica, perché la matrice dei coefficienti del sistema lineare può essere mal-condizionata e quindi rendere difficile la convergenza degli algoritmi di soluzione.

Considerati i problemi di tipo numerico cui si è fatto cenno si raccomanda, in fase di presentazione dei risultati, di indicare per ogni simulazione effettuata quale metodo risolutivo è stato utilizzato, se sia stata raggiunta la convergenza e quale sia stato il parametro di tolleranza assegnato.

Nel caso in cui non venga raggiunta la convergenza, la soluzione trovata non ha validità dal punto di vista numerico. In questi casi si può: a) aumentare il numero di iterazioni; b) utilizzare altre altezze di inizializzazione; c) utilizzare differenti metodi risolutivi.

Quando viene raggiunta la convergenza, cioè è stata trovata una soluzione, occorre che siano verificate a posteriori alcune condizioni:

1. Il campo piezometrico trovato deve soddisfare le equazioni di bilancio globale e locale. Ciò significa che su tutto il dominio (bilancio globale) e su ogni elemento di discretizzazione spaziale e temporale (bilancio locale) la somma algebrica dei termini di sorgente e dei flussi al contorno deve essere circa nulla (caso stazionario) o al termine di immagazzinamento (caso transitorio). In caso contrario, le altezze piezometriche calcolate non sono una soluzione ammissibile del problema posto. In tutti i codici commerciali esiste la possibilità di calcolare il bilancio idrico in ogni cella e su tutto il dominio e dunque di verificare la bontà della soluzione trovata. Generalmente viene considerato accettabile un errore sul bilancio intorno all'1% (Anderson and Woessner, 1992).
2. Il campo piezometrico calcolato potrebbe dipendere dalle altezze di inizializzazione e/o dal metodo risolutivo adottato. In generale, soprattutto se vengono individuati elementi di non linearità, è opportuno simulare la medesima condizione di flusso applicando più tecniche risolutive e confrontare le diverse soluzioni ottenute.

I prodotti attesi al termine di questa fase sono la restituzione delle mappe piezometriche simulate, il valore delle altezze piezometriche calcolate nei punti in corrispondenza dei quali sono state effettuate le misure delle altezze piezometriche (da utilizzare nelle successive fasi di calibrazione 10 e validazione 11), le portate erogate alle eventuali sorgenti o gli scambi con i corpi idrici superficiali, tabelle riassuntive del bilancio globale e locale.

Riassumendo Fase 6: Fase di calcolo



- ✓ analisi delle criticità legate alla risoluzione numerica
- ✓ definizione dei metodi risolutivi e dei criteri di convergenza adottati
- ✓ superamento delle difficoltà di convergenza legate alla non linearità
- ✓ verifica a posteriori del bilancio locale e globale
- ✓ restituzione della mappe piezometriche simulate, e dei valori simulati in corrispondenza dei punti di misura
- ✓ restituzione delle tabelle riassuntive del bilancio globale

Figura 29. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 6 “Fase di calcolo”.

10 FASE 7 - CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Il processo di calibrazione è uno degli elementi chiave per lo sviluppo di un modello numerico affidabile, cioè rappresentativo della realtà fisica in esame. Per tale motivo vengono discussi in questo capitolo alcuni aspetti di carattere teorico che, tuttavia, hanno risvolti pratici di estrema importanza.

Secondo [Barnett et al. \(2012\)](#) *“Calibration is a process, following model design and construction, by which parameters are adjusted until model predictions fit historical measurements or observations, so that the model can be accepted as a good representation of the physical system of interest”*. Il problema fondamentale insito nel processo di calibrazione è che in generale esistono diversi insiemi di parametri che riproducono le variabili osservate con uguale accuratezza (non unicità del “problema inverso”, i.e. [Poeter e Hill, 1997](#); [Carrera et al 2005](#); [Moore and Doherty, 2005](#); [Giudici et al. 2008](#); [Vassena et al. 2008](#); [Hendricks-Franssen et al. 2009](#); [Baratelli et al. 2011](#); [Comunian e Giudici, 2018](#)). Più in generale, *“it may be endemic to mechanistic modelling of complex environmental systems that there are many different model structures and many different parameter sets within a chosen model structure that may be behavioural or acceptable in reproducing the observed behaviour of that system”* ([Beven, 2001](#)).

Il modello deve essere in grado di riprodurre in maniera soddisfacente i valori osservati delle variabili descrittive dello stato del sistema. Tuttavia, il fatto che un modello riproduca correttamente il dato osservato non implica di per sé che esso sia affidabile, occorre considerare anche la quantità e densità dell’informazione disponibile, dal momento che meno dati sono disponibili e più facile sarà riprodurli (tutto sommato, per un punto passano infinite rette e per due punti passa una e una sola retta ...).

Seguendo una metodologia di tipo “trial and error” ([Hill, 1998](#); [Hill et al. 2000](#)) la fase di calibrazione può essere così schematizzata:

1. Scelta dei dati osservati (altezze piezometriche e/o flussi) da utilizzare come target (target). (Par. 10.1)
2. Scelta del parametro rispetto al quale effettuare la calibrazione. (Par. 10.2)
3. Assegnazione dei valori numerici dei parametri non soggetti a calibrazione. (Par.10.3)
4. Assegnazione dei valori numerici del parametro soggetto a calibrazione. (Par.10.4)
5. Confronto tra altezze piezometriche osservate e altezze piezometriche simulate. (Par.10.5)
6. Valutazione della bontà della calibrazione. (Par.10.6)

Se la calibrazione ottenuta è considerata non soddisfacente occorre effettuare una nuova calibrazione partendo dal passo 4.

10.1 Scelta dei target

Sono considerati dati osservati di piezometria da utilizzare come target del modello i valori puntuali delle altezze piezometriche misurate. Le mappe piezometriche interpolate devono, viceversa, essere utilizzate per confronti di tipo qualitativo, dal momento che un confronto di tipo statistico tra altezze piezometriche osservate e modellate può essere effettuato solo sui dati puntuali (Par. 10.5).

In generale è preferibile considerare come target tutti i punti di misura utilizzati per l’elaborazione delle piezometrie di riferimento.

⁷ La calibrazione è un processo che segue le fasi di ideazione e sviluppo per mezzo del quale i parametri sono “aggiustati” fino a quando le predizioni del modello non riproducono le misure storiche o le osservazioni in modo tale che il modello possa essere considerato una buona rappresentazione del sistema fisico di interesse.

⁸ Può essere una caratteristica propria della modellazione deterministica di un sistema ambientale complesso che vi siano molte strutture di modello e molti insiemi di parametri nell’ambito del modello scelto che riproducono in modo accettabile il comportamento di tale sistema.

In alcune situazioni idrogeologiche il dato osservato non è l'altezza piezometrica ma il flusso idrico: si pensi, ad esempio, alla simulazione della curva di recessione di una sorgente (box 16). La procedura di calibrazione che viene descritta nel presente capitolo resta ovviamente valida considerando come variabile di confronto il flusso invece che le altezze piezometriche.

Box 16. Portate come target

Nella maggioranza dei casi il modellista conosce, talvolta in modo soddisfacente, il campo piezometrico dell'acquifero da simulare, grazie alla presenza di pozzi, sondaggi e di altre indagini geognostiche che permettono di determinare la quota delle superfici piezometriche di interesse e la sua variabilità spaziale e temporale. Questo riguarda gli acquiferi delle valli alluvionali o delle zone pianeggianti e collinari dove l'accesso primario alle risorse idriche sotterranee è tramite pozzi e perforazioni. Il problema da risolvere durante la calibrazione del modello consiste quindi nel far coincidere al meglio il campo dei potenziali misurati con quello calcolato, che è il target della simulazione sia in regime stazionario che transitorio. Tuttavia, è spesso complicato definire sperimentalmente il bilancio idrico, a causa delle numerose componenti la cui misura di campo è difficoltosa, fra cui le complesse interazioni falda-fiume, l'infiltrazione zenitale, le eventuali entrate dai versanti (dirette o attraverso conoidi), le estrazioni da pozzi, eccetera.

In alcuni contesti idrogeologici, ad esempio gli acquiferi montuosi quali quelli appenninici, l'informazione più frequentemente disponibile consiste nella portata erogata dalle sorgenti, sia perché l'accesso alle risorse è avvenuto tradizionalmente mediante la captazione delle sorgenti, sia perché spesso la superficie freatica si trova a profondità di decine e talvolta centinaia di metri dal piano campagna. Per questo motivo sono solitamente più rari i pozzi o i sondaggi che perforino l'acquifero fino alla falda basale e il campo dei potenziali è poco o per nulla conosciuto all'interno dell'idrostruttura. Inoltre, raramente si dispone di dati sulla trasmissività o sul coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero, la cui stima mediante prove di portata, peraltro, è talmente legata a situazioni locali, specie negli acquiferi carbonatici, da essere difficilmente estrapolabile alla scala dell'acquifero.

Nelle situazioni idrogeologiche descritte, la calibrazione del modello ha come target la distribuzione ed il regime di portata delle emergenze. Occorre inoltre sottolineare che non sempre la misura della portata erogata è agevole: quando un acquifero alimenta un tratto di corso d'acqua con sorgenti in alveo in modo diffuso (*sorgenti lineari*) occorre determinare la portata differenziale (*a quote diverse*) del corso d'acqua in periodi di magra, da cui ricavare l'incremento del flusso di base di un determinato tratto fluviale.

Nelle situazioni idrogeologiche descritte, dunque, i dati disponibili, che costituiscono il target del modello, sono costituiti da misure della portata, in alcuni casi occasionali, in altri acquisite con frequenza giornaliera per periodi anche pluriennali. Nota la portata di tutte le sorgenti, puntuali e/o lineari, si può stimare la ricarica media delle falde mediante calcoli di bilancio. Il target della simulazione sarà quindi la distribuzione della portata erogata alle diverse sorgenti o tratti di corso d'acqua drenante in regime stazionario, e il regime della portata nelle simulazioni in transitorio.

Nella Figura 30 è riportato un esempio di simulazione (3D alle differenze finite) della portata erogata da un acquifero carbonatico lungo un corso d'acqua. Alle celle corrispondenti al tratto fluviale in esame sono state assegnate condizioni di Cauchy. La portata simulata (linea blu) è posta a confronto con alcune misure differenziali di incremento in alveo (pallini blu) e una ricostruzione basata su dati idrometrici dell'incremento di portata giornaliero (linea tratteggiata rossa) che costituiscono il target della simulazione in regime transitorio.

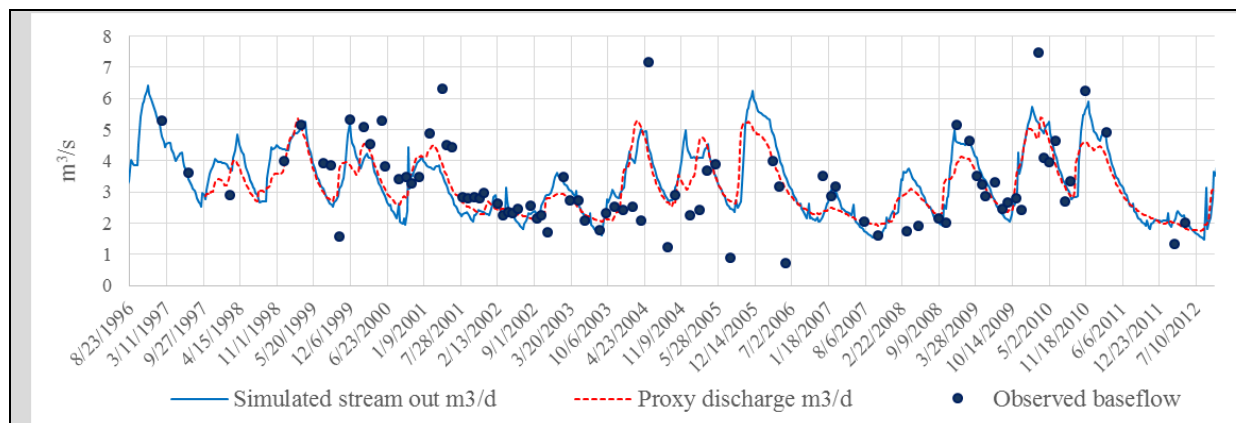


Figura 30. Esempio di simulazione in cui il target è rappresentato dalla portata erogata dalle celle con condizione di Cauchy rappresentanti un tratto di sorgente lineare lungo un corso d'acqua (rielaborazione da Di Salvo et al. 2016)

Nonostante la notevole differenza di assetto idrogeologico fra acquiferi alluvionali o di pianura e acquiferi montuosi, dal punto di vista modellistico l'approccio è identico: data una distribuzione di K (o di T), la geometria dell'acquifero, i termini di sorgente (ricarica zenitale, estrazioni, interazione con i corpi idrici superficiali ecc.), le condizioni al contorno, si calcola il campo dei potenziali corrispondente. L'equazione di flusso, rappresentata nella 12 nel caso particolare di flusso 2D in un mezzo isotropo ed omogeneo in regime stazionario, ha tre incognite: il campo dei potenziali h , il bilancio (che comprende le condizioni al contorno e la distribuzione dei termini di sorgente Q), la trasmissività (T).

$$\nabla^2 h = Q/T \quad (12)$$

Nel caso di un acquifero alluvionale o di pianura in genere si conosce in maniera soddisfacente il campo piezometrico (h), viceversa nel caso dell'acquifero carbonatico si conosce in maniera soddisfacente il bilancio (Q); in entrambi i casi è estremamente complessa la stima del parametro idrogeologico (trasmissività o conducibilità idraulica), poiché il fattore di scala, la eterogeneità del mezzo, l'errore sperimentale rendono spesso poco significativi alla scala del modello i dati provenienti da misure puntuali eventualmente disponibili. Esistono quindi, a seconda del contesto idrogeologico, diverse grandezze che possono essere utilizzate come target di un modello di flusso.

10.2 Scelta dei parametri rispetto ai quali effettuare la calibrazione

La calibrazione del modello numerico può essere effettuata rispetto a una o più delle seguenti grandezze:

- Conducibilità/trasmissività idraulica.
- Porosità efficace/coefficiente di immagazzinamento.
- Termini di sorgente
- Conduttanza (nel caso si utilizzino condizioni al contorno di Cauchy).

Ricordiamo che in fase di elaborazione del modello concettuale si era indicato per ognuno dei parametri prima elencati un valore medio ed un *range* di possibili valori (Par. 6.5). In generale, si consiglia di procedere individuando il parametro che si ritiene soggetto a maggior incertezza ed effettuando in prima istanza su di esso la calibrazione.

10.3 Assegnazione dei valori numerici dei parametri soggetti a calibrazione

I valori numerici dei parametri soggetti a calibrazione vengono fatti variare all'interno del range di possibili valori definito in fase di elaborazione del modello concettuale (capitolo 6). Se, in fase di calibrazione del modello, al fine di simulare correttamente il campo piezometrico di riferimento, risultasse necessario utilizzare valori dei parametri fuori dal range individuato nella fase di sviluppo del modello concettuale e quindi non attendibili dal punto di vista fisico o idrogeologico (ad esempio un valore di infiltrazione efficace pari a 1000 mm in un'area dove la piovosità media annuale è 500 mm), allora è opportuno mettere in evidenza una incongruenza fra modello numerico e modello concettuale che deve essere valutata con attenzione, sia rivisitando il modello concettuale stesso che la conseguente impostazione del modello.

10.4 Confronto tra altezze piezometriche osservate e altezze piezometriche simulate

Una volta assegnati i valori numerici del parametro soggetto a calibrazione viene calcolata la nuova piezometria corrispondente.

Il confronto deve essere effettuato sui valori delle altezze piezometriche calcolati in corrispondenza dei punti di misura. Gli strumenti, grafici e statistici, più adatti per effettuare il confronto sono i seguenti:

- *Grafico di dispersione “valori osservati vs. valori simulati”*. Una buona calibrazione si ha se i punti si dispongono approssimativamente lungo la retta con pendenza di 45° che identifica l'uguaglianza tra valori osservati e simulati.
- *Grafico di dispersione “valori osservati vs. residui”*. Con il termine residui intendiamo la differenza tra altezze piezometriche osservate e altezze piezometriche calcolate. Una buona calibrazione si ha se il valore dei residui non è mai troppo elevato e i punti si dispongono in maniera casuale intorno all'asse delle ascisse. Una certa correlazione tra valori osservati e residui, anche se questi ultimi sono bassi, può essere indice di una calibrazione non soddisfacente (ad esempio una sovrastima o una sottostima del modello rispetto ai dati sperimentali su tutto il dominio o su un'area).
- *Mappa dei residui*. Mostra la posizione dei punti di misura e il valore dei residui all'interno del dominio di flusso. Tale mappa completa le informazioni fornite dal grafico precedente.
- *Istogramma dei residui*. Un istogramma distribuito intorno allo zero con un andamento di tipo gaussiano è indice di una buona calibrazione. La calibrazione è tanto migliore quanto più piccata è la distribuzione dei residui intorno allo zero.
- *Analisi statistica dei residui*. In [Tabella 9](#) sono presentate le misure statistiche che si suggerisce di calcolare sull'insieme dei residui. Sono state utilizzate le seguenti notazioni:

H_i^{oss} = altezza piezometrica osservata nel punto *i-esimo*.

H_i^{sim} = altezza piezometrica simulata nel punto *i-esimo*.

$R_i = H_i^{sim} - H_i^{oss}$ residuo nel punto *i-esimo*.

Tabella 9. Indicatori statistici per l'analisi della distribuzione dei residui

DESCRIZIONE	EQUAZIONE	COMMENTO
massimo e minimo	$\max(R_i)_{i=1,\dots,n}$ $\min(R_i)_{i=1,\dots,n}$	La ricerca dei massimi e dei minimi all'interno dell'insieme dei residui consente di individuare l'esistenza di outliers
mean bias <i>MB</i>	$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$	Una media dei residui prossima allo zero può essere indice di una buona calibrazione. Un valore della media significativamente diverso da zero è indice di una calibrazione non corretta.
Radice dell'errore quadratico medio (<i>RMSE</i>)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_i R_i)^2}$	La radice dell'errore quadratico medio è indice della dispersione degli errori intorno alla media. La calibrazione è tanto migliore quanto più piccolo è tale valore. I pesi W_i (0-1) possono essere aggiunti per dare un peso maggiore nel calcolo degli indici alle misure considerate più affidabili. Deve ovviamente valere la condizione $\sum_{i=1}^n W_i = 1$
Coefficiente di asimmetria	$\sigma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - m)^3}{\sigma^3}$	Un coefficiente di asimmetria significativamente diverso da 0 è indice di una distribuzione non centrata e quindi di una prevalenza di residui positivi (sovrastima del modello rispetto alle osservazioni) o negativi (sottostima del modello rispetto alle osservazioni)

10.5 Valutazione della bontà della calibrazione

Un modello è considerato soddisfacente quando i valori di piezometria e/o di portata simulati sono "simili" ai valori osservati. Non è semplice dare indicazioni univoche che consentano tale valutazione, dal momento che in generale l'affidabilità di un modello e quindi la sua calibrazione va valutata in relazione agli obiettivi del modello stesso. In generale possiamo tuttavia indicare i seguenti elementi di valutazione:

- le direzioni di flusso osservate sono riprodotte correttamente in tutto il dominio;
- il mean bias e la radice dell'errore quadratico medio sono vicini allo zero;
- la distribuzione probabilistica dell'errore non presenta asimmetrie significative che indicano una prevalenza di valori sovrastimati o sottostimati;
- gli errori, sia in valore assoluto che in segno, sono distribuiti uniformemente sul dominio spaziale. In altre parole, gli errori non si concentrano in una specifica porzione del dominio di flusso.

Se, viceversa, la calibrazione ottenuta è considerata non soddisfacente sulla base degli indicatori presentati nel paragrafo precedente, occorre effettuare una nuova calibrazione. In generale è necessario analizzare i motivi di una cattiva calibrazione: ciò potrebbe infatti essere dovuto non solo alla stima errata dei parametri idrogeologici o dei valori di input, ma anche ad una inconsistenza fisica del modello concettuale di riferimento: in tal caso si rende necessaria una riformulazione del modello concettuale stesso.

Occorre rilevare che *non è sufficiente identificare un valore dei parametri tale per cui la piezometria simulata si avvicini alla piezometria osservata per poter considerare realistico il modello stesso*. Infatti la calibrazione effettuata potrebbe non essere unica per i seguenti motivi:

1. Possono esistere diversi parametri soggetti ad incertezza rispetto ai quali effettuare una calibrazione e, dunque, possono esistere diversi insiemi di valori dei parametri che permettono di simulare correttamente la piezometria di riferimento (vedi [box 17](#) e [box 18](#)).
2. Anche nel caso in cui vi sia un solo parametro soggetto ad incertezza possono esistere diverse distribuzioni di tale parametro che determinano il medesimo campo di moto (questo problema è strettamente connesso con la non unicità della soluzione del problema inverso).

Per tali motivi un modello calibrato rispetto ad un solo insieme di dati (cioè sulla base di un'unica piezometria di riferimento) non può considerarsi di per sé stesso rappresentativo della realtà in esame, ma è necessaria una fase di validazione del modello (capitolo 11).

In Figura 31 sono mostrate le fasi di lavoro necessarie per la calibrazione del modello.

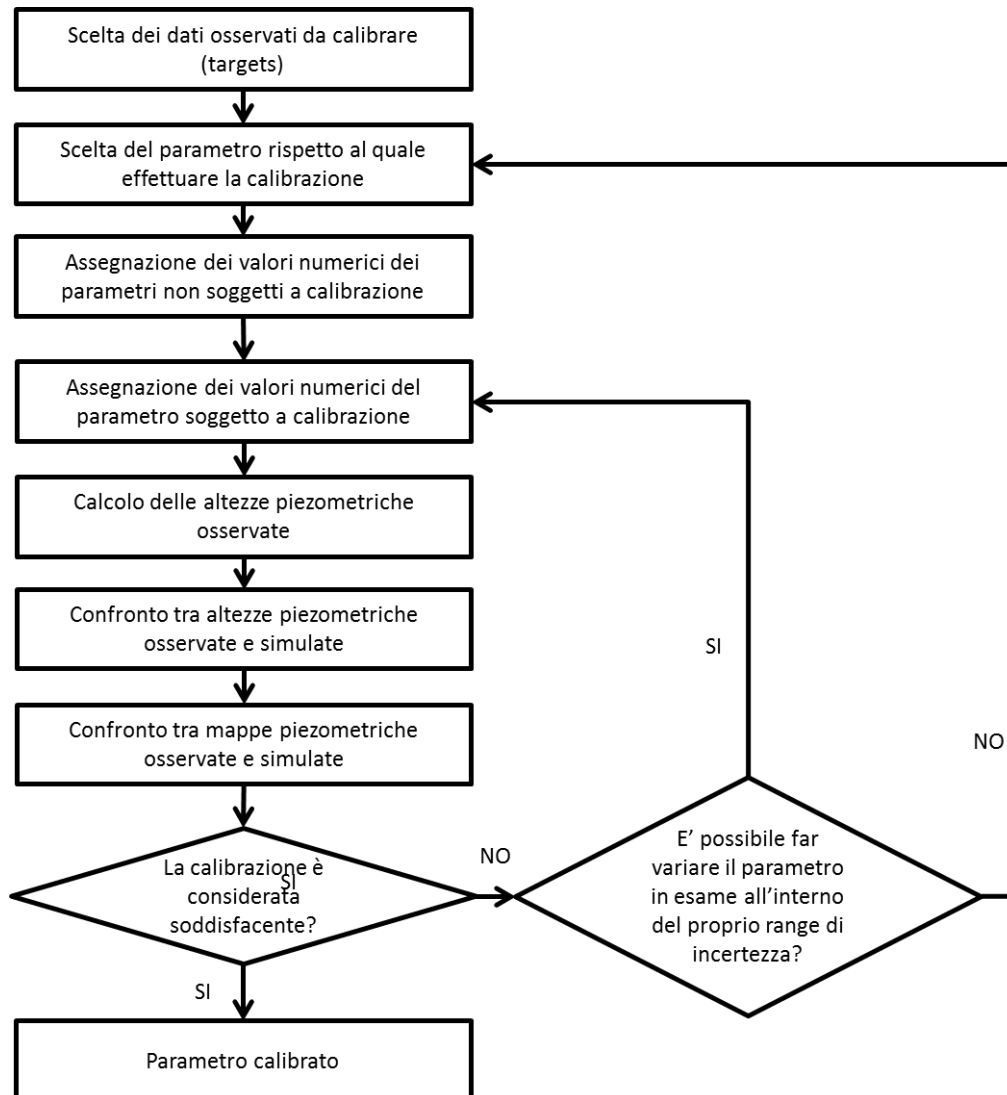


Figura 31. Fasi di lavoro per la calibrazione di un modello numerico

Box 17. La relazione tra k e Q e il problema della calibrazione

Consideriamo un acquifero freatico, omogeneo e isotropo, il cui flusso è governato dalla seguente equazione:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = T \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + R \quad (13)$$

dove S_y è il coefficiente di immagazzinamento specifico [-], T la trasmissività [$L^2 \cdot T^{-1}$] e R un termine di sorgente rappresentante la ricarica all'acquifero [$L \cdot T^{-1}$]

In condizioni stazionarie, le altezze freatiche soddisfano l'equazione

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \approx \frac{R}{T} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \approx \frac{R}{T} \quad (14)$$

In questo caso, valori osservati di h supportano la stima del rapporto R/T , ma non di R e T in maniera indipendente. Ciò implica che esistono infinite coppie di valori (R, T) che soddisfano l'equazione (14) e quindi consentono di simulare correttamente i dati di piezometria osservati; in altre parole, si può ottenere la medesima distribuzione delle altezze piezometriche calcolate aumentando (o diminuendo) la trasmissività e la ricarica del medesimo fattore. Ne risulta che il problema è indeterminato a meno di conoscere con certezza la distribuzione di R o il campo delle T .

Non è semplice dare regole pratiche che permettano di valutare se i dati disponibili siano sufficienti per ottenere una buona calibrazione. In linea del tutto generale si può tuttavia indicare una regola di base: per identificare (calibrare) N parametri è necessario disporre di dati relativi ad altrettante condizioni di flusso/trasporto differenti. A nostro avviso, tale regola dovrebbe essere applicata in modo stringente, sia in fase di sviluppo che in fase di valutazione di un modello.

Così, nel caso dell'esempio precedente (equazione di flusso in condizioni stazionarie) occorrono almeno due insiemi di dati, relativi a due condizioni stazionarie differenti, affinché il problema di identificabilità sia positivamente risolto. In caso contrario, si rischia di ridurre la modellistica numerica ad un guscio vuoto, ma senza un'effettiva utilità.

Box 18 - L'uso dei modelli inversi nella fase di calibrazione

Nella fase di calibrazione del modello è possibile utilizzare procedure numeriche che risolvono problemi inversi. I modelli inversi calcolano, utilizzando come target la piezometria di riferimento e/o dati di portata, i valori del parametro oggetto della calibrazione che meglio riproducono la piezometria stessa.

Alcuni di essi (ad esempio i software PEST, [Doherty, 2002](#); UCODE, [Poeter and Hill, 1999](#)) utilizzano come target il valore puntuale dei dati di piezometria, altri (ad esempio il software MODAC, [Guo and Zhang, 2000](#)) e il software CMM (Comparison Model Method, [Comunian e Giudici, 2021](#)) utilizzano come target le mappe piezometriche di riferimento (quindi utilizzano come target tutti i valori di altezza piezometrica ottenuti dall'interpolazione su una griglia dei valori osservati).

La calibrazione ottenuta con metodi di inversione deve comunque essere analizzata confrontando le altezze piezometriche osservate con le altezze piezometriche calcolate mediante gli strumenti presentati nel Par. 10.5.

Qui di seguito viene definito un problema inverso per la stima del parametro conducibilità, in condizioni stazionarie.

INPUT

- Il dominio di flusso D .
- Lo schema di discretizzazione.
- Il valore del potenziale per ogni elemento della discretizzazione.
- Il termine di sorgente Q per ogni elemento della discretizzazione.
- Le condizioni al contorno

OUTPUT

- La conducibilità k per ogni elemento della discretizzazione.

In maniera del tutto analoga può essere definito il problema inverso qualora si vogliano identificare i termini di sorgente.

INPUT

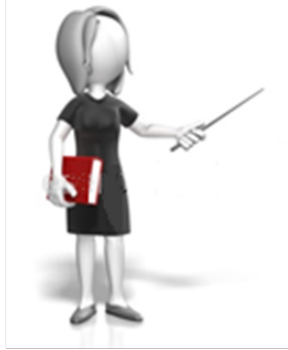
- Il dominio di flusso D .
- Lo schema di discretizzazione.
- Il valore del potenziale in ogni per ogni elemento della discretizzazione.
- La conducibilità k per ogni elemento della discretizzazione.

OUTPUT

- Il termine di sorgente Q .

A seguito della verifica della congruenza tra i risultati del modello e le osservazioni sperimentali mediante gli strumenti grafici e statistici presentati nel Par. 10.5, il prodotto di questa fase è costituito dalle mappe della distribuzione spaziale dei parametri soggetti a calibrazione.

Riassumendo Fase 7: Calibrazione del modello



- ✓ selezione dei dati osservati (altezze piezometriche e/o flussi) da simulare
- ✓ selezione del parametro da calibrare (K, T, S, termini di sorgente, conduttanza)
- ✓ assegnazione dei valori numerici dei parametri non soggetti a calibrazione
- ✓ assegnazione dei valori numerici del parametro soggetto a calibrazione
- ✓ confronto tra valori misurati e valori simulati
- ✓ valutazione della bontà della calibrazione
- ✓ eventuale riassegnazione di valori al parametro soggetto a calibrazione
- ✓ realizzazione delle mappe della distribuzione spaziale dei parametri soggetti a calibrazione.

Figura 32. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 7 “Calibrazione del modello”

11 FASE 8 - VALIDAZIONE DEL MODELLO

L'obiettivo di questa fase è la valutazione della capacità del modello numerico calibrato di simulare il comportamento del medesimo sistema acquifero in una situazione di flusso diversa da quella utilizzata per la calibrazione.

Le osservazioni che seguono sono di carattere qualitativo, ma poggiano su una robusta base matematica: il problema della modellazione inversa e della stima dei parametri idrogeologici ha una storia lunga ormai 40 anni! Sull'argomento si rimanda alla vastissima letteratura scientifica; fra i lavori di maggiore interesse citiamo: [Neumann, 1973](#); [Yakowitz, 1980](#); [Ponzini and Lozej 1982](#); [Dagan, 1985](#); [Carrera and Neumann, 1986](#); [Yeh, 1986](#); [Giudici et al., 1995](#); [Poeter and Hill, 1997](#); [Guo and Zhang, 2000](#); [Beven and Freer, 2001](#); [Bredehoeft and Konikow, 1992](#); [de Marsily et al. 1992](#); [Konikow and Bredehoeft, 1992](#); [Bredehoeft, 2005](#); [Carrera et al. 2005](#); [Moore and Doherty, 2005](#); [Hendricks-Franssen et al. 2009](#); [Comunian and Giudici, 2018](#).

Per validare il modello è necessario identificare una situazione di flusso, diversa da quella utilizzata in fase di calibrazione, della quale si conoscano la piezometria di riferimento, le condizioni al contorno e il valore delle variabili di input che si suppone determinino tale situazione di flusso (nel seguito con il termine "*insieme di dati*", faremo riferimento ai dati necessari affinché una determinata condizione di flusso sia compiutamente descritta: campo piezometrico, termini di sorgente, condizioni al contorno).

Una volta introdotti i valori dei parametri di input si procede al confronto tra valori di piezometria osservati e simulati utilizzando gli stessi strumenti grafici e statistici presentati nel paragrafo relativo alla calibrazione del modello (Par. 10.5). La validazione può essere considerata soddisfacente se i residui o le differenze tra osservazioni e simulazioni sono dello stesso ordine di grandezza o hanno le stesse proprietà statistiche di quelle ritrovate in fase di calibrazione.

La fase di validazione è imprescindibile affinché il modello di flusso possa essere considerato attendibile, dal momento che un modello calibrato rispetto ad una sola situazione di flusso non può considerarsi di per sé stesso rappresentativo della realtà in esame.

A tale proposito osserviamo che:

- Nella modellazione del flusso in condizioni stazionarie esistono almeno due parametri rispetto ai quali effettuare la calibrazione: il campo delle conducibilità k e la distribuzione dei termini di sorgente Q . In generale possono esistere infinite combinazioni di k e Q che inserite nel modello come dati di input consentono di simulare la medesima piezometria (vedi [box 17](#) e [box 19](#)). Di conseguenza, a meno di non conoscere con esattezza la distribuzione dell'uno o dell'altro (cosa pressoché impossibile), sono necessari almeno due insiemi di dati, relativi a due condizioni di flusso differenti, per poter validare il modello. È inoltre necessario verificare che le piezometrie utilizzate facciano riferimento a condizioni di equilibrio dell'acquifero.
- Nella modellazione del flusso in condizioni transitorie i parametri rispetto ai quali effettuare la calibrazione sono almeno tre (distribuzione di conducibilità idraulica, porosità efficace/coefficiente di immagazzinamento specifico e termine di sorgente). Per tale motivo affinché un modello in condizioni transitorie sia validato è necessario possedere i dati relativi a tre condizioni di flusso differenti. Esse possono essere:
 - o Due insiemi di dati indipendenti in stazionario e un insieme di dati in transitorio.
 - o Un insieme di dati indipendente in stazionario e due insiemi di dati in transitorio.
 - o Tre insiemi di dati indipendenti in transitorio.

Qualora si possieda una serie temporale sufficientemente lunga, è possibile utilizzare i dati relativi ad un primo periodo per la calibrazione e i rimanenti dati per la validazione

In tutti i casi descritti, la disponibilità di nuovi dati, ottenuti anche dopo la validazione del modello, deve essere considerata ed eventualmente portare a revisionare il modello.

È importante sottolineare ancora una volta il fatto che l'impossibilità di ottenere una calibrazione e validazione soddisfacenti può indicare la necessità di una revisione del modello concettuale di

riferimento, dal momento che spesso il motivo di una cattiva calibrazione risiede nell'incoerenza nel modello concettuale di partenza.

Nel [box 19](#) è presentato un esempio di calibrazione e validazione del modello numerico di flusso sviluppato per l'acquifero di Petrignano d'Assisi (regione Umbria).

Box 19. Calibrazione e validazione

Nell'esempio che segue sono mostrati risultati della fase di calibrazione e validazione del modello numerico dell'acquifero di Petrignano d'Assisi, i cui termini di bilancio sono già stati presentati nel box 11.

La calibrazione è stata effettuata considerando come target le altezze piezometriche misurate nella campagna 1974 (Figura 13, pannello b), quindi in condizioni indisturbate dell'acquifero. Mediante il codice di inversione MODAC (Guo and Zhang, 2000) è stato calibrato il campo delle conducibilità idrauliche per tre differenti valori di infiltrazione efficace ipotizzati: 150 mm/anno, 200 mm/anno, 250 mm/anno.

I risultati delle tre calibrazioni effettuate sono mostrati in Figura 33, Figura 34 e Figura 35.

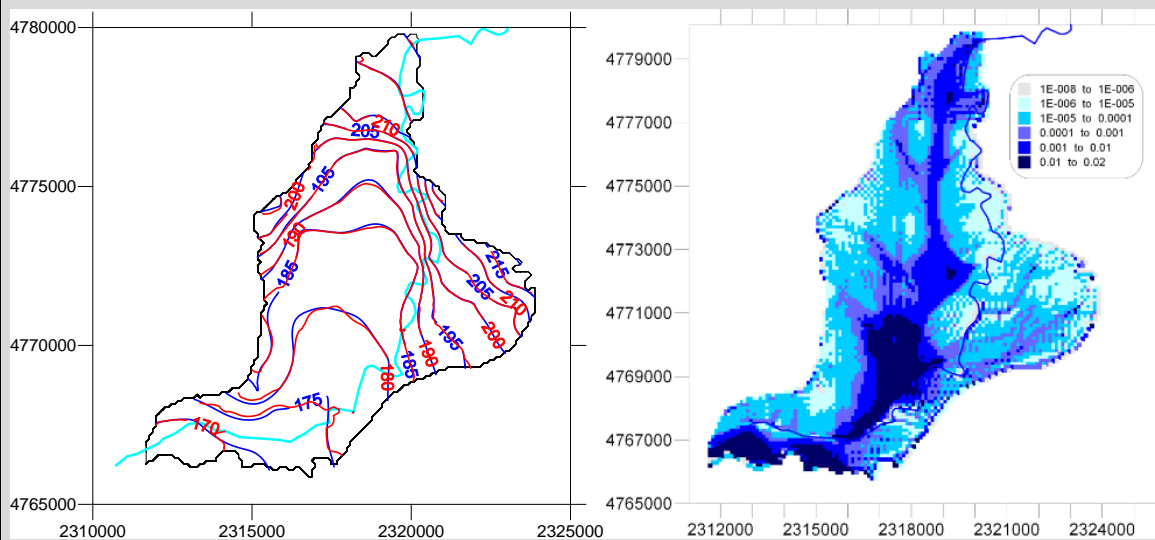


Figura 33. Mappa a sinistra: confronto tra piezometria osservata (isolinee rosse) e piezometria simulata (isolinee blu) nell'ipotesi di $I_{eff} = 150$ mm/anno. Mappa a destra: corrispondente campo di conducibilità idraulica calcolato (m/s)

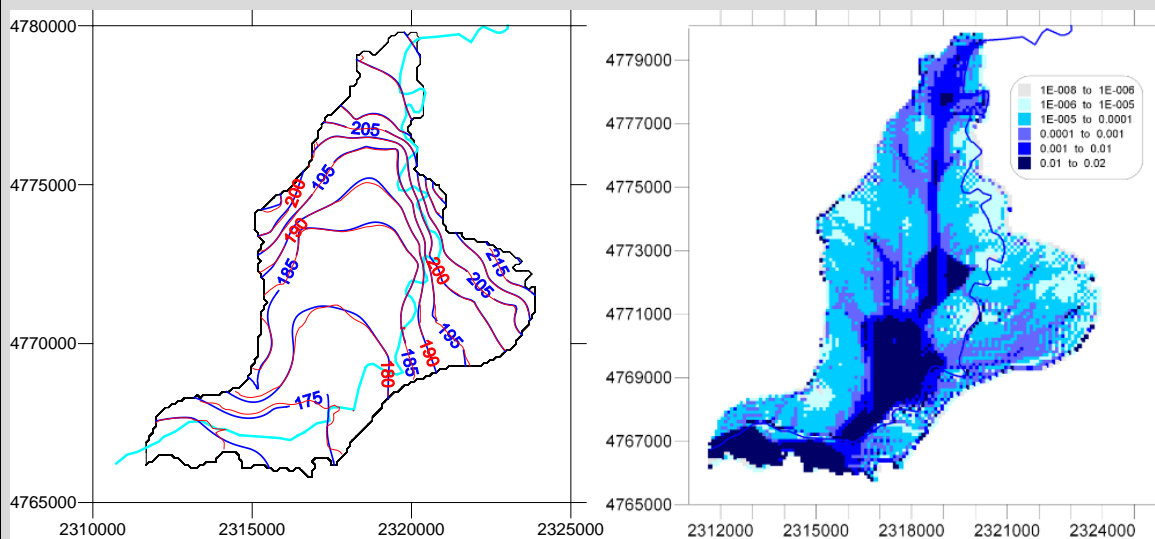


Figura 34. Mappa a sinistra: confronto tra piezometria osservata (isolinee rosse) e piezometria simulata (isolinee blu) nell'ipotesi di $I_{eff} = 200$ mm/anno. Mappa a destra: corrispondente campo di conducibilità idraulica calcolato (m/s)

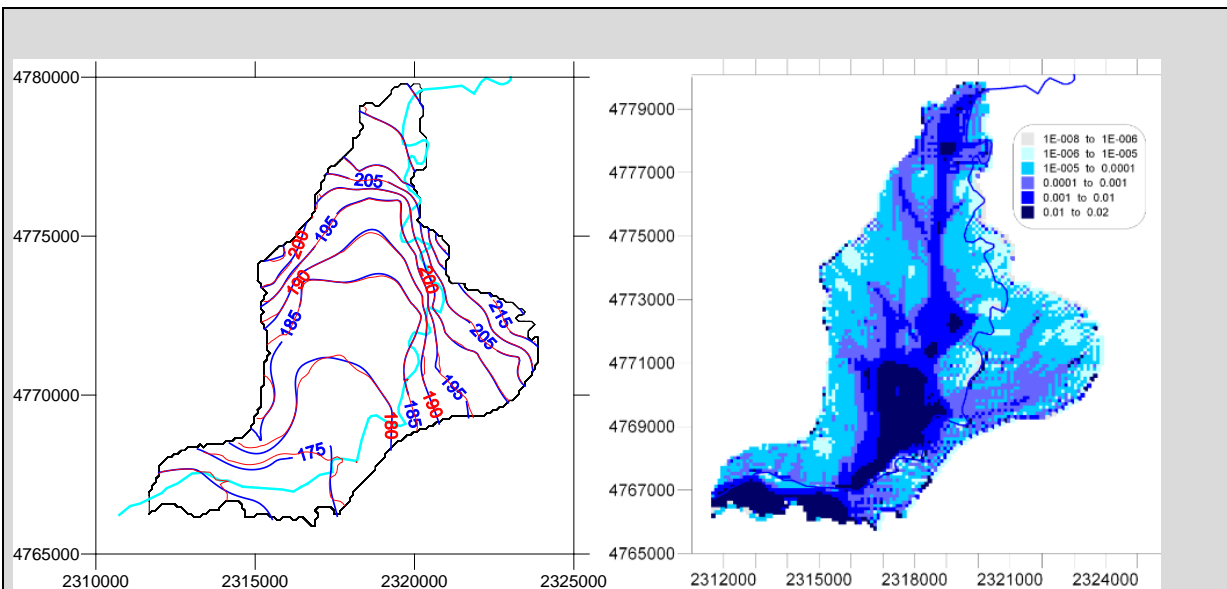


Figura 35. *Mappa a sinistra: confronto tra piezometria osservata (isolinee rosse) e piezometria simulata (isolinee blu) nell'ipotesi di $I_{eff} = 250$ mm/anno. Mappa a destra: corrispondente campo di conducibilità idraulica calcolato (m/s)*

Come si evince dal confronto tra le tre calibrazioni effettuate, è stato possibile mediante calibrazione individuare tre diversi campi di conducibilità idraulica simili nel pattern, ma diversi nei valori assoluti, che simulano in maniera pressoché identica il campo piezometrico osservato sotto le tre diverse ipotesi di infiltrazione proposte. È dunque necessaria una validazione del modello considerando una diversa condizione di flusso, rappresentata da una diversa distribuzione di altezze piezometriche determinata da una variazione di una o più forzanti.

Nell'esempio presentato in questo box, la validazione è stata ottenuta considerando la piezometria osservata nel 2004 (box 11, pannello c) determinata dalla messa in funzione del campo pozzi di Petrignano d'Assisi. Il bilancio di massa dell'acquifero in condizioni di sfruttamento è stato presentato nel box 11.

Le medesime portate in estrazione sono state imposte ai modelli caratterizzati dai campi di conducibilità idraulica di Figura 33, Figura 34 e Figura 35, stimati sotto le tre diverse ipotesi di infiltrazione efficace (150 mm/anno, 200 mm/anno e 250 mm/anno). In Figura 36 sono riportati i risultati ottenuti in termini di differenze puntuali tra le altezze piezometriche simulate e quelle osservate, nell'ipotesi $I_{eff} = 200$ mm/anno (pannello di sinistra) e $I_{eff} = 250$ mm/anno. La piezometria simulata nell'ipotesi $I_{eff} = 150$ mm/anno non è stata mostrata perché presenta una vasta area, ubicata nel centro della piana, di celle secche, cioè in corrispondenza delle quali il modello calcola valori di altezza piezometrica inferiori al letto dell'acquifero.

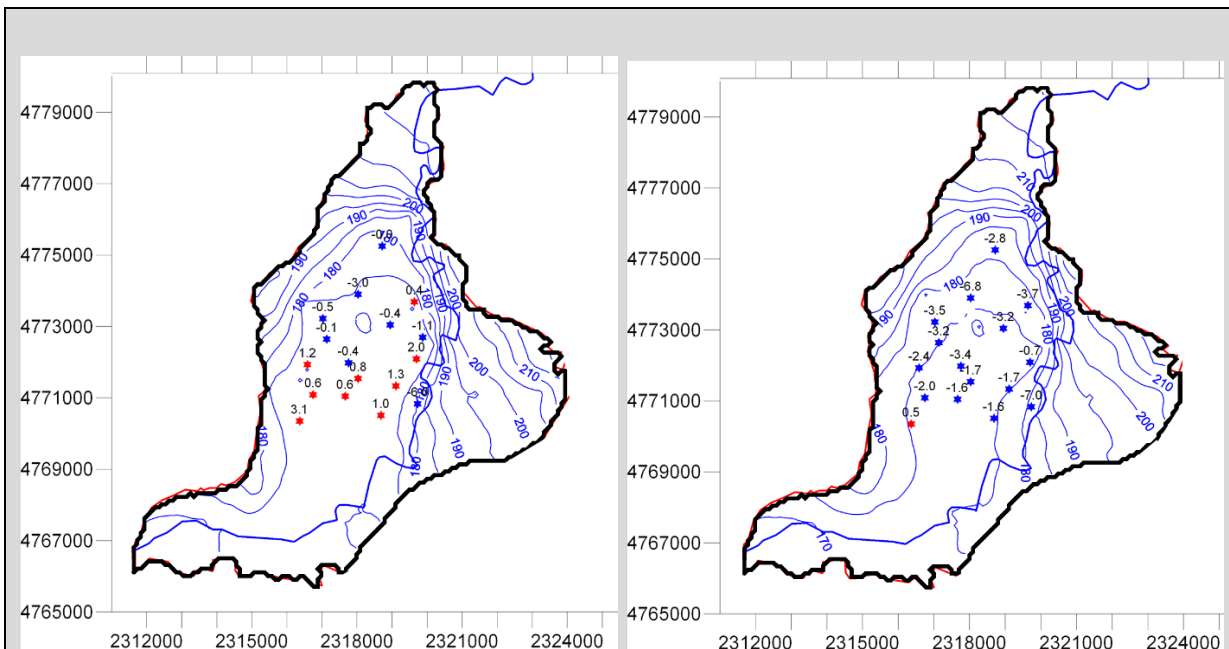


Figura 36. Differenze tra altezze piezometriche simulate e altezze piezometriche osservate nell'ipotesi $I_{eff} = 200$ mm/anno (sinistra) e $I_{eff} = 250$ mm/anno (mappa di destra)

Ricordiamo che le due simulazioni presentate in [Figura 36](#) sono state ottenute imponendo i medesimi valori dei termini di bilancio e delle condizioni al contorno (eccetto, ovviamente, l'infiltrazione efficace e il campo di conducibilità idraulica precedentemente calibrato). È evidente come nell'ipotesi di $I_{eff} = 250$ mm/anno, il modello sottostima le altezze piezometriche osservate (errore medio = -2.8 m; errore medio assoluto = 2.9 m; errore quadratico medio = 3.4 m). Ciò è dovuto al fatto che le conducibilità idrauliche stimate sotto l'ipotesi $I_{eff} = 250$ mm/anno risultano necessariamente maggiori delle conducibilità idrauliche stimate sotto l'ipotesi $I_{eff} = 200$ mm/anno, dal momento che il gradiente idraulico è lo stesso (vincolato dalle altezze piezometriche osservate): in base alla legge di Darcy, a parità di gradiente a portate circolanti nell'acquifero maggiori devono corrispondere conducibilità idrauliche maggiori.

Viceversa, il campo di conducibilità idraulica stimato nell'ipotesi $I_{eff} = 200$ mm/anno determina, in condizioni di sfruttamento dell'acquifero ([Figura 36](#), pannello di sinistra), abbassamenti compatibili con gli abbassamenti osservati (errore medio = 0.5 m; errore medio assoluto = 1.0 m; errore quadratico medio = 1.4 m).

Riassumendo Fase 8: Validazione del modello



- ✓ scelta di ulteriori situazioni di flusso, differenti rispetto a quelle utilizzate in fase di calibrazione
- ✓ confronto mediante strumenti grafici e statistici tra valori dei target osservati e simulati
- ✓ verifica congruenza tra modello concettuale e simulazioni: nuova calibrazione dei parametri idrogeologici o dei valori di input e/o riformulazione del modello concettuale

Figura 37. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 8 “Validazione del modello”.

12 FASE 9 - ANALISI DI SENSIBILITÀ E UTILIZZO DEL MODELLO COME STRUMENTO PREVISIONALE

Il modello numerico, una volta calibrato e validato, può essere utilizzato come strumento previsionale e gestionale, calcolando il campo piezometrico determinato da un particolare scenario definito a priori (variazioni della ricarica, delle condizioni di sfruttamento dell'acquifero, dell'interazione tra acquifero e corpi idrici superficiali, interventi antropici quali la costruzione di dreni o infrastrutture sotterranee, ecc.).

Gli scenari da simulare devono essere concordati tra committente e modellista.

Le previsioni del modello devono sempre essere corredate da un'opportuna analisi di sensibilità.

Mediante l'analisi di sensibilità si vuole stimare l'intervallo dei possibili valori del campo piezometrico modellato in funzione dell'incertezza nella stima dei parametri idrogeologici e delle variabili forzanti. In tal modo è possibile valutare quantitativamente l'incertezza delle previsioni fornite dal modello e quindi il suo livello di affidabilità come strumento gestionale. Nella pratica si lancia il modello per molte distribuzioni diverse dei parametri per determinare il loro impatto sugli output del modello. Si può operare su un parametro alla volta (scelta più semplice e più comunemente utilizzata) o su più parametri insieme per valutare l'impatto della loro variazione simultanea sull'output del modello.

I parametri e/o le variabili forzanti rispetto ai quali effettuare l'analisi di sensibilità sono i seguenti:

- Conducibilità idraulica
- Porosità efficace/coefficiente di immagazzinamento.
- Termini di sorgente (l'analisi deve essere condotta separatamente per ognuno dei termini di sorgente individuati: infiltrazione, emungimenti puntuali, emungimenti distribuiti, eccetera)
- Conduttanza (nel caso si utilizzino condizioni al contorno di Cauchy).

La fase di analisi di sensibilità può essere così schematizzata:

1. Scelta del parametro o dei parametri rispetto ai quali effettuare l'analisi. L'analisi di sensibilità può essere condotta su un solo parametro per volta, in maniera tale che la variazione sull'output del modello sia imputabile alla variazione di un solo termine di input. Operare su un solo parametro per volta permette di identificare quanto l'incertezza di tale parametro influisce sull'incertezza dei risultati.
2. Stima del range di incertezza. Le fasi di calibrazione e validazione, se effettuate, hanno certamente ridotto il margine di incertezza attribuibile a ciascuno dei dati di input. Tuttavia esso è ancora presente ed è connesso con l'accuratezza dei risultati ottenuti durante le fasi di calibrazione e validazione. Se queste ultime non sono state effettuate, l'incertezza sui dati di input è almeno pari all'incertezza sui dati misurati ([capitolo 5](#)). Sulla base delle considerazioni proposte, si stimi un range di incertezza per ogni parametro in esame indicando un valore minimo, un valore medio e un valore massimo. Su tali valori verrà effettuata l'analisi di sensibilità.
3. Calcolo delle altezze piezometriche. Si simuli il campo piezometrico per i valori minimo, medio e massimo del parametro in esame individuati al punto 2. Si presentino i risultati ottenuti nei tre diversi casi sia in termini di mappe piezometriche che in termini di valori puntuali in corrispondenza dei punti di misura.

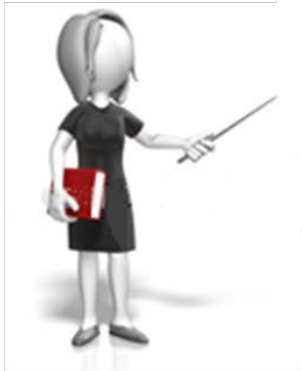
L'analisi di sensibilità può essere condotta adottando un approccio multi-parametrico (si veda, ad esempio, [Baratelli et al. 2012](#); [Baroni e Francke, 2020](#)), mediante il quale è possibile valutare non solo la sensibilità ai singoli parametri, ma anche l'impatto sull'output del modello delle incertezze "congiunte" tra due o più parametri). Occorre tuttavia sottolineare che tale approccio è ancora relativamente poco utilizzato nella modellistica idrogeologica, anche perché pochi software dispongono di tool di questo tipo.

I risultati dell'analisi di sensibilità devono essere analizzati criticamente al fine di valutare l'attendibilità del modello numerico sviluppato e delle previsioni simulate. Senza tale analisi lo sviluppo del modello è da considerarsi incompleto.

Possiamo elencare alcuni elementi di valutazione qualitativa dell'analisi di sensibilità:

- Se il modello si rivela troppo sensibile alle variazioni anche piccole di un parametro, in particolar modo quando il range è limitato, allora esso deve essere utilizzato con molta cautela come strumento previsionale. E' preferibile, in questo caso, la raccolta di un numero maggiore di dati in maniera da diminuire il margine di incertezza.
- L'analisi di sensibilità è tanto più importante quanto maggiore è il margine di incertezza sui parametri. In particolar modo si raccomanda di assegnare range di incertezza ampi a quei parametri stimati esclusivamente in base a dati di letteratura e valutare le differenti risposte del modello.

Riassumendo Fase 9: Utilizzo del modello come strumento previsionale ad analisi di sensibilità



- ✓ individuazione di scenari futuri (variazioni delle condizioni al contorno, termini di sorgente)
- ✓ simulazione degli scenari futuri in funzione delle ipotesi relative alle variazioni delle variabili di input
- ✓ restituzione delle mappe piezometriche e/o dati relativi ai flussi idrici calcolati in funzione degli input rappresentativi dello scenario futuro
- ✓ analisi di sensibilità: stima dell'intervallo dei possibili valori del campo piezometrico modellato in funzione dell'incertezza nella stima dei parametri idrodinamici e delle variabili forzanti

Figura 38. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 9 "Utilizzo del modello come strumento previsionale ed analisi di sensibilità"

13 FASE 10 - ELABORAZIONE DELLA RELAZIONE FINALE E CONSEGNA DEL MODELLO

La relazione finale deve riportare in maniera completa ed esaustiva tutte le fasi di sviluppo del modello numerico. Nella redazione della relazione si raccomanda di seguire lo stesso schema utilizzato per lo sviluppo del modello numerico, che per comodità riportiamo qui di seguito:

1. Definizione degli obiettivi del modello ([capitolo 4](#))
2. Analisi dei dati disponibili ([capitolo 5](#)).
3. Elaborazione del modello concettuale di riferimento ([capitolo 6](#)).
4. Scelta del codice di calcolo ([capitolo 7](#)).
5. Implementazione del modello numerico ([capitolo 8](#)).
6. Fase di calcolo ([capitolo 9](#)).
7. Calibrazione del modello ([capitolo 10](#)).
8. Validazione del modello ([capitolo 11](#)).
9. Analisi di sensibilità e utilizzo del modello come strumento previsionale ([capitolo 12](#)).

Insieme alla relazione è opportuno che vengano forniti tutti i documenti e i file per l'utilizzo del modello mediante il software concordato tra committente e modellista: l'utente finale deve essere in grado di effettuare tutte le simulazioni effettuate dal modellista e riportate nella relazione. Nel caso in cui il modello sia stato sviluppato mediante software commerciali, è opportuno verificare l'eventuale disponibilità di viewer/reader gratuiti in grado di leggere i file di input/output del modello e tutte le impostazioni relative.

Inoltre, la relazione tecnica che illustrerà e definirà la modellistica prodotta dovrà contenere almeno i seguenti elaborati:

- Mappa rappresentativa della estensione del modello;
- Mappa rappresentativa della griglia di calcolo;
- Mappa con l'ubicazione dei pozzi/piezometri;
- Sezioni geologiche in cui siano evidenziati i differenti livelli in cui è stata suddivisa verticalmente l'area di studio ed i rapporti con le unità idrogeologiche;
- Stratigrafie dei sondaggi;
- Mappa rappresentativa delle condizioni al contorno assegnate;
- Mappa rappresentativa della distribuzione delle aree di ricarica;
- Mappa rappresentativa dei termini di sorgente;
- Mappa rappresentativa della distribuzione dei parametri idrogeologici;
- Tabella/e dei valori dei parametri idrogeologici assegnati a ciascun orizzonte idrostratigrafico.

Qualora siano stati elaborati dal modellista codici di calcolo proprietari, la consegna o meno di tali codici deve essere concordata tra committente e modellista in fase di stesura del capitolato tecnico.

Riassumendo Fase 10: Elaborazione della relazione finale e consegna del modello



- ✓ verifica dei contenuti (punti 1-9) della relazione finale
- ✓ consegna della relazione finale, completa di elaborati cartografici
- ✓ consegna dei file necessari alla riproduzione delle simulazioni effettuate
- ✓ consegna di eventuali codici proprietari (se previsto dal contratto/ procedimento)

Figura 39. Riassunto dei punti da affrontare nella Fase 10 “Elaborazione della relazione finale e consegna del modello”

14 LA MODELLAZIONE DEL TRASPORTO E IL PARTICLE TRACKING. CENNI

Sebbene la modellazione del trasporto non rientri specificamente tra gli argomenti delle presenti note, tuttavia è evidente che in molte situazioni la modellazione del flusso è propedeutica alla modellazione del trasporto di sostanze in un acquifero poroso.

Riteniamo quindi utile introdurre brevemente in questo capitolo l'equazione che descrive il bilancio di massa di una o più sostanze disciolte nella fase liquida di un sistema acquifero di tipo poroso.

In linea generale, i meccanismi chimico-fisici che governano la distribuzione di una sostanza in un mezzo poroso saturo possono essere così esemplificati:

1. *Trasporto advettivo* → flusso di una sostanza determinato dal flusso della fase liquida, caratterizzato in ogni punto del dominio spaziale e ad ogni istante da una velocità $\underline{v}(\underline{x}, t)$
2. *Trasporto diffusivo* → flusso di una sostanza determinato dal gradiente di concentrazione (diffusione molecolare, legge di Fick)
3. *Trasporto dispersivo* → flusso di una sostanza determinato dalla dispersione meccanica
4. *Interazioni chimiche/elettriche* tra la sostanza e la fase solida del mezzo poroso (ad esempio: fenomeni di adsorbimento)
5. *Trasporto reattivo* → interazioni chimiche tra specie diverse e/o fenomeni di decadimento
6. *Immissione o estrazione* di una sostanza mediante immissione o estrazione della fase liquida nell'acquifero o dall'acquifero

L'equazione generale che descrive il trasporto in un mezzo poroso, nell'ipotesi in cui la porosità efficace del mezzo è costante nel tempo, è la seguente:

$$\frac{\partial(n \cdot c(\underline{x}, t))}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[n_e \left(c(\underline{x}, t) \cdot \underline{v}(\underline{x}, t) - D_h \cdot \nabla c(\underline{x}, t) \right) \right] - f \pm n\rho Y - W + I \quad (15)$$

dove:

$c(\underline{x}, t)$ = concentrazione della sostanza nel punto $\underline{x} = (x, y, z)$ all'istante t

$\underline{v}(\underline{x}, t)$ = velocità della fase liquida nel punto x all'istante t

n_e = porosità efficace del mezzo

D_h = coefficiente di diffusione/dispersione idrodinamica

f = massa di contaminante rilasciata dalla roccia o adsorbita da essa per unità di volume del mezzo poroso, per unità di tempo

Y = tasso di incremento o perdita dei contaminante per unità di massa di fluido, per unità di tempo

W, I = quantità di massa di contaminante immesso o tolto dall'acquifero nell'unità di tempo.

Occorre sottolineare che in molte situazioni pratiche la componente advettiva risulta predominante ai fini della modellazione del trasporto, ed in ogni caso una modellazione attendibile di processi di trasporto non può prescindere da una modellazione attendibile di processi di flusso.

È possibile avere un'indicazione, seppur approssimativa, del destino di una sostanza rilasciata in un acquifero e dei tempi di transito mediante il cosiddetto "tracciamento" o "particle tracking", basato sul campo di velocità $\underline{v}(\underline{x}, t)$ calcolato come output di un modello di flusso.

In generale la velocità macroscopica in ogni punto \underline{x} e ad ogni istante t è definita come:

$$\vec{v}(\underline{x}, t) = \frac{k(\underline{x})}{n_e(\underline{x})} \text{grad } h(\underline{x}, t) \quad (16)$$

Essa dipende quindi in ogni punto \underline{x} e ad ogni istante t dal campo delle altezze piezometriche, ed in particolare dal gradiente del campo delle altezze piezometriche.

Nota la distribuzione nello spazio e nel tempo delle altezze piezometriche sulla griglia di calcolo (sia essa regolare come nel caso di un approccio alle differenze finite, o irregolare come nel caso di un approccio agli elementi finiti) è possibile stimare mediante l'equazione (16) e l'utilizzo di opportune tecniche numeriche il campo di velocità $v(\underline{x}, t)$ e quindi, assegnata una posizione di rilascio iniziale, la traiettoria di una ipotetica particella di una sostanza solidale con la fase liquida. Il tracciamento di tale traiettoria, denominato abitualmente "particle tracking", fornisce quindi una stima della componente advettiva del trasporto in termini di destino della sostanza e tempi di transito.

Notiamo esplicitamente che nell'eq. (15) e nell'eq.(16) compare la "porosità efficace", inferiore alla "porosità totale", intesa come rapporto tra il volume dei vuoti e il volume totale di un campione di mezzo poroso. L'utilizzo del valore di porosità totale può quindi portare ad una sottostima delle velocità in gioco e quindi ad una sovrastima dei tempi di migrazione.

In [Figura 40](#) è riportato un esempio di stima della traiettoria di una particella solidale con la fase liquida nel caso di griglia regolare e schematizzazione alle differenze finite.

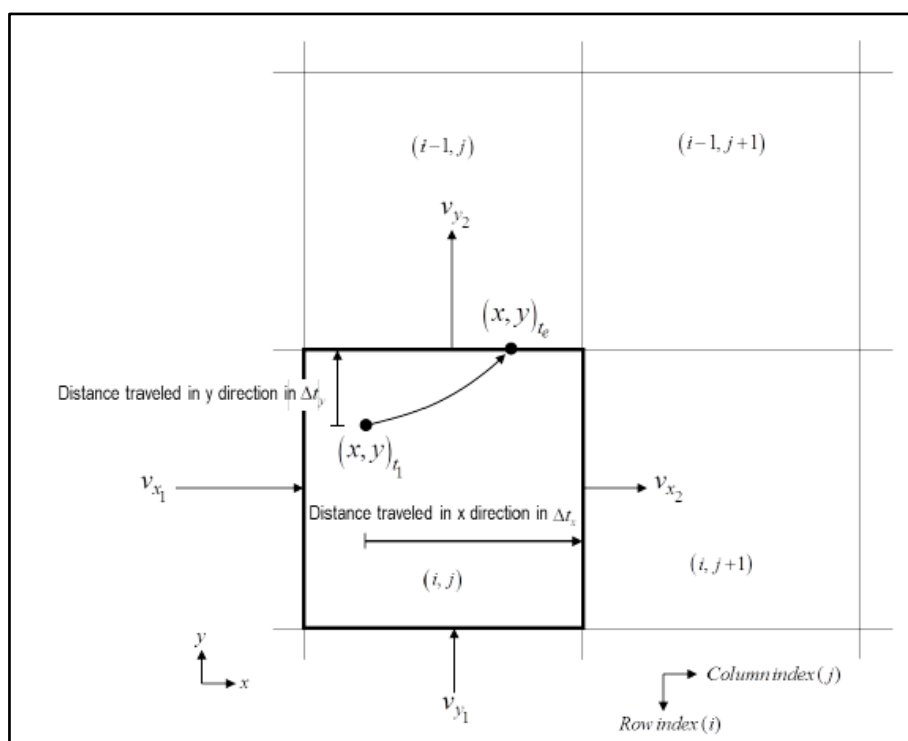


Figura 40. Esempio di stima della traiettoria di una particella solidale con la fase liquida (particle tracking) nel caso di schematizzazione alle differenze finite (da [Pollock, 2016](#))

15 SCHEDE DI VALUTAZIONE

15.1 Scheda di controllo

La presente scheda sintetizza, per ogni fase di lavoro individuata nel testo, i punti chiave necessari per lo sviluppo di un modello numerico di flusso. Essa può essere utilizzata dal committente o dall'ente di controllo per una verifica della completezza del lavoro svolto.

Tabella 10. Fasi di lavoro per lo sviluppo di un modello di flusso, obiettivi e prodotti attesi

FASE DI LAVORO	PUNTI CHIAVE	✓
DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI DEL MODELLO (cap. 4)	Descrizione degli obiettivi del modello	
	Descrizione dei fenomeni da modellare	
	Individuazione dei dati necessari relativi alle variabili di input	
	Individuazione dei dati necessari relativi alle variabili di output	
	Individuazione dei dati necessari relativi ai parametri idrogeologici	
	Individuazione della scala spaziale	
	Individuazione della scala temporale	
ANALISI DEI DATI DISPONIBILI (cap. 5)	Classificazione dei dati disponibili	
	Attribuzione di un range di incertezza ai dati disponibili	
	Valutazione dell'adeguatezza dei dati disponibili rispetto agli obiettivi del modello	
ELABORAZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DI RIFERIMENTO (cap. 6)	Definizione della geometria dell'acquifero e dell'area di interesse, identificazione dei livelli acquiferi, acquicludi e acquitardi.	
	Individuazione delle condizioni al contorno.	
	Elaborazione della piezometria (o delle piezometrie) di riferimento ed analisi dell'attendibilità delle piezometrie elaborate.	
	Valutazione del bilancio globale dell'acquifero, stima di tutti i termini che possono concorrere alla definizione del bilancio complessivo e relativa incertezza	
	Distribuzione dei parametri idrogeologici (conducibilità o trasmissività, coefficiente di immagazzinamento/porosità efficace) e valutazione del range di incertezza associato.	
SCELTA DEL CODICE DI CALCOLO (cap.7)	Specifiche contrattuali relative ai software utilizzati e alla proprietà dei software stessi	
IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO (cap. 8)	Scelta del regime di flusso	
	Definizione del dominio spaziale e del dominio temporale	
	Definizione degli schemi numerici di discretizzazione spaziale e temporale	
	Definizione delle condizioni al contorno.	
	Assegnazione delle condizioni iniziali	
	Attribuzione dei valori numerici dei parametri idrogeologici ad ogni elemento che costituisce la discretizzazione del dominio di flusso.	

	Attribuzione dei valori numerici dei termini di sorgente ad ogni elemento che costituisce la discretizzazione del dominio di flusso.	
	Implementazione del modello all'interno del codice di calcolo scelto (creazione dei file necessari per la fase di calcolo).	
FASE DI CALCOLO (cap. 9)	Definizione dei metodi risolutivi adottati e dei criteri di convergenza	
	Altezze piezometriche calcolate nei punti in corrispondenza dei quali sono stati raccolti i dati di piezometria.	
	Tabelle riassuntive del bilancio globale e locale	
CALIBRAZIONE DEL MODELLO (cap. 10)	Mappe piezometriche simulate	
	Verifica della congruenza tra risultati del modello e osservazioni sperimentali.	
	Mappe della distribuzione spaziale dei parametri soggetti a calibrazione	
VALIDAZIONE DEL MODELLO (cap. 11)	Scelta di una seconda situazione di flusso differente rispetto a quella utilizzata nella fase di calibrazione	
	Verifica della congruenza tra risultati del modello e osservazioni sperimentali.	
	In caso di incongruenza tra modello e simulazioni → verifica della fonte di errore: <ul style="list-style-type: none"> - Stima errata dei parametri idrogeologici o dei valori di input → nuova fase di calibrazione. - Inconsistenza fisica del modello concettuale di riferimento → riformulazione del modello concettuale. 	
ANALISI DI SENSIBILITA' E UTILIZZO DEL MODELLO COME STRUMENTO PREVISIONALE (cap. 12)	Mappe piezometriche e/o dati relativi ai flussi idrici calcolati in funzione di diversi valori delle variabili di input	
	Analisi di sensibilità sui risultati delle simulazioni predittive	
ELABORAZIONE DELLA RELAZIONE FINALE E CONSEGNA DEL MODELLO (cap. 13)	Relazione finale nel formato (o nei formati) concordati.	
	Files necessari affinché il committente sia in grado di riprodurre le simulazioni effettuate	

Le schede che seguono offrono uno strumento per un'analisi in corso d'opera del lavoro del modellista. Esse possono essere utilizzate con diversi obiettivi:

1. Fornire al committente elementi utili per una valutazione critica del lavoro del modellista.
2. Aiutare il modellista nella fase di implementazione del modello evidenziando gli elementi critici e le eventuali lacune esistenti (a livello di dati, elaborazioni, modello concettuale di riferimento, eccetera)
3. Consentire un agevole scambio di informazioni tra committente e modellista, per una verifica puntuale del lavoro sia in corso d'opera che alla consegna

15.2 Fase di lavoro 1: definizione degli obiettivi del modello (capitolo 4)

Tabella 11. Scheda di valutazione della fase 1: definizione degli obiettivi del modello.

Criteri di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
I fenomeni da modellare sono stati definiti compiutamente?	<input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> Solo in parte	cap. 4 Tabella 2
Sono stati individuati i dati relativi alle variabili di output necessari per l'implementazione del modello numerico?	<input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> Solo in parte	cap. 4 Tabella 2
Sono stati individuati i dati relativi alle variabili di input necessari per l'implementazione del modello numerico?	<input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> Solo in parte	cap. 4 Tabella 2
Sono stati individuati i dati relativi ai parametri idrogeologici necessari per l'implementazione del modello?	<input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> Solo in parte	cap. 4 Tabella 2
E' stata definita la scala spaziale e temporale dei fenomeni in esame?	<input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> Solo in parte	cap. 4 Box 11 Tabella 2
In generale, sono stati definiti compiutamente gli obiettivi del modello?	<input type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> Solo in parte	

15.3 Fase di lavoro 2: analisi dei dati disponibili (capitolo 5)

Tabella 12. Scheda di valutazione della fase 2: analisi dei dati disponibili.

Criteria di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
Esiste un elenco completo di tutti i dati forniti?	O SI O NO O Solo in parte	
Per i dati disponibili è stata redatta una scheda di caratterizzazione?	O SI O NO O Solo in parte	Par.5.1 Tabella 3
E' stata valutata la qualità dei dati disponibili?	O SI O NO O Solo in parte	Par.5.2 Tabella 4 Box 10
E' stato effettuato un confronto tra dati necessari per l'implementazione del modello numerico e dati disponibili?	O SI O NO	Par.5.1 Tabella 3 Par.5.3 Tabella 4 Box 11
I dati forniti sono stati giudicati adeguati rispetto agli obiettivi del modello?	O SI O NO O Solo in parte	Par.5.3 Box 11
Si ritiene necessaria l'acquisizione di ulteriori dati? Eventualmente, quali?	O SI O NO	

15.4 Fase di lavoro 3: elaborazione del modello concettuale di riferimento (capitolo 6)

Tabella 13. Scheda di valutazione della fase 3: elaborazione del modello concettuale di riferimento.

Criteria di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
È stata definita l'area di interesse? L'area di interesse coincide con i limiti idrogeologici dell'acquifero?	O SI O NO O Solo in parte	Par.6.1
Sono state individuate le unità idrostratigrafiche, le caratteristiche di confinamento degli acquiferi e il comportamento idraulico dell'acquifero sulla frontiera dell'area di interesse?	O SI O NO O Solo in parte	Par.6.2 Par.6.3
È stata effettuata una stima dei termini del bilancio idrogeologico nell'area di interesse	O SI O NO O Solo in parte	Par.6.3
È stata effettuata una stima dei parametri idrogeologici?	O SI O NO O Solo in parte	Par.5.3 Tabella 4 Box 11 Par. 6.4
È indicata per ognuno dei parametri idrogeologici la natura dei dati disponibili (dati osservati, stimati, di letteratura)?	O SI O NO O Solo in parte	Par.5.1 Tabella 3 Par.6.4
È indicato per ognuno dei parametri idrogeologici l'intervallo di incertezza?	O SI O NO O Solo in parte	Par.5.3 Tabella 4 Par.6.4
Sono state elaborate una o più piezometrie di riferimento?	O SI O NO	Par.6.5
L'interpolazione dei dati puntuali di piezometria è stata effettuata mediante tecniche di tipo geostatistico? Quali? Tali tecniche sono indicate e giustificate? Sono indicati i parametri utilizzati in fase di interpolazione?	O SI O NO O Solo in parte	Par.6.5
È stata analizzata la rappresentatività temporale e spaziale delle mappe di piezometria?	O SI O NO O Solo in parte	Par.6.5
È stata valutata la compatibilità dei gradienti idraulici che emergono dalle mappe con le ipotesi sul bilancio idrogeologico?	O SI O NO O Solo in parte	Par.6.5
Il modello concettuale è stato definito compiutamente?	O SI O NO	

15.5 Fase di lavoro 4: scelta del codice di calcolo (capitolo 7)

Tabella 14. Scheda di valutazione della fase 4: scelta del codice di calcolo.

Criteri di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
È stato richiesto l'utilizzo di codici proprietari? Nel capitolato tecnico sono indicati i codici di calcolo da utilizzare e la proprietà dei software eventualmente utilizzati? Nel caso in cui si richieda lo sviluppo di codici proprietari, è stato chiaramente specificato nel capitolato tecnico chi sia il proprietario del codice e se il codice stesso debba essere consegnato o meno al committente?	O SI O NO	cap.7
È stata valutata la compatibilità del codice scelto con altri codici di simulazione eventualmente utilizzati?	O SI O NO	cap.7
È stata valutata la compatibilità del codice scelto con il codice utilizzato per la gestione di GIS?	O SI O NO	cap.7

15.6 Fase di lavoro 5: implementazione del modello numerico (capitolo 8)

Tabella 15. Scheda di valutazione della fase 5: implementazione del modello numerico.

Criteri di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
I limiti dell'area di interesse coincidono con i limiti idrogeologici dell'acquifero? È stato definito il dominio di flusso del modello? Il dominio di flusso è coincidente con l'area di interesse?	O SI O NO O Solo in parte	Par.8.1
È stato individuato il regime di flusso (stazionario o transitorio) da simulare?	O SI O NO	Par.8.2
Metodo di discretizzazione adottato	O Differenze finite O Elementi finiti O Volumi finiti	Par.8.3
È indicato lo schema di discretizzazione adottato (2D, quasi 3D, 3D)?	O SI O NO O Solo in parte	Par.8.3.1 Par.8.3.2
Nel caso di modello in regime transitorio, sono stati definiti degli intervalli di sollecitazione (stress periods) e il passo di discretizzazione temporale (time step)?	O SI O NO	Par.8.4
Sono state assegnate le condizioni al contorno sulla griglia di discretizzazione spaziale scelta?	O SI O NO O Solo in parte	Par.8.5 Box 12
In caso di modellazione di un acquifero costiero è stato modellato un flusso a densità variabile?	O SI O NO	Par.8.5 Box 13
In caso di modello in transitorio, sono state assegnate le condizioni iniziali?	O SI O NO O Solo in parte	Par.8.6
Sono stati definiti i parametri idrogeologici sulla griglia di discretizzazione spaziale scelta?	O SI O NO O Solo in parte	Par.8.7
Sono stati definiti i termini di sorgente sulla griglia di discretizzazione spaziale e temporale scelta?	O SI O NO	Par.8.8
In generale sono stati definiti tutti gli elementi necessari per l'implementazione del modello numerico?	O SI O NO O Solo in parte	

15.7 Fase di lavoro 6: fase di calcolo (capitolo 9)

Tabella 16. Scheda di valutazione della fase 6: fase di calcolo

Criteri di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
I modelli implementati presentano elementi di non linearità?	O SI O NO	cap. 9
Sono indicati i metodi risolutivi adottati?	O SI O NO	cap. 9
È indicato il parametro di tolleranza assegnato?	O SI O NO	cap. 9
Il procedimento iterativo converge ad una soluzione?	O SI O NO	cap. 9
È stato calcolato il bilancio locale e il bilancio globale?	O SI O NO O Solo in parte	cap. 9
I bilanci idrici sono rispettati?	O SI O NO	cap. 9

15.8 Fase di lavoro 7: calibrazione del modello (capitolo 10)

Tabella 17. Scheda di valutazione della fase 7: calibrazione del modello.

Criteri di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
È stata effettuata la fase di calibrazione del modello?	O SI O NO	cap. 10
Per la calibrazione è stata utilizzata una metodologia...	O trial-and-error O automatizzata (modelli inversi)	cap. 10 Box 18
Nel caso di procedura automatizzata, è stato indicato il codice di calcolo utilizzato?	O SI O NO	cap. 10 Box 18
Sono stati scelti ed indicati i dati osservati utilizzati come target?	O SI O NO O Solo in parte	Par.10.1
Sono scelti ed indicati i parametri rispetto ai quali effettuare la calibrazione? È stato assegnato il valore numerico dei parametri soggetti a calibrazione all'interno del range dei possibili valori definiti in fase di elaborazione del modello concettuale?	O SI O NO	Par.10.2 Par.10.3
I risultati della calibrazione sono stati analizzati in termini di...	O grafico di dispersione "valori osservati vs. valori simulati" O grafico di dispersione "valori osservati vs. residui" O mappa dei residui O istogramma dei residui O analisi statistica dei residui O altro (specificare)	Par.10.4 Par.10.4 Tabella 9
La fase di calibrazione è stata giudicata soddisfacente?	O SI O NO	Par.10.5 Box 14
Nel caso di calibrazione non soddisfacente, è stata fatta una revisione del modello concettuale di riferimento?	O SI O NO	Par.10.5

15.9 Fase di lavoro 8: validazione del modello (capitolo 11)

Tabella 18. Scheda di valutazione della fase 8: validazione del modello.

Criteria di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
È stata effettuata la fase di validazione del modello utilizzando una o più situazioni di flusso diverse da quella utilizzata in fase di calibrazione??	O SI O NO	cap. 11
Sono stati scelti ed indicati chiaramente i dati osservati utilizzati come target?	O SI O NO O Solo in parte	cap. 11
I risultati della validazione sono stati analizzati in termini di...	O grafico di dispersione “valori osservati vs. valori simulati” O grafico di dispersione “valori osservati vs. residui” O mappa dei residui O istogramma dei residui O analisi statistica dei residui O altro (specificare)	Par.10.5 Par.10.5 Tabella 9

15.10 Fase di lavoro 9: Analisi di sensibilità e utilizzo del modello come strumento previsionale (capitolo 12)

Tabella 19 Scheda di valutazione della fase 9: utilizzo del modello come strumento previsionale e analisi di sensibilità.

Criteri di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
Il modello è stato utilizzato anche come strumento previsionale?	O SI O NO	cap. 12
Gli scenari di previsione sono stati definiti in maniera esaustiva dal committente?	O SI O NO O Solo in parte	cap. 12
È stata effettuata un'analisi di sensibilità sui risultati delle previsioni?	O SI O NO O Solo in parte	cap. 12
I risultati dell'analisi di sensibilità sono stati compiutamente presentati?	O SI O NO O Solo in parte	cap. 12

15.11 Fase di lavoro 10: elaborazione della relazione finale e consegna del modello (capitolo 13)

Tabella 20. Scheda di valutazione della fase 10: elaborazione della relazione finale e consegna del modello

Criteria di valutazione	Valutazione	Riferimenti al testo
Nella relazione finale sono stati trattati i seguenti argomenti?	<input type="checkbox"/> Definizione degli obiettivi del modello (cap. 4) <input type="checkbox"/> Analisi dei dati disponibili (cap. 5) <input type="checkbox"/> Elaborazione del modello concettuale di riferimento (cap. 6) <input type="checkbox"/> Scelta del software (cap. 7) <input type="checkbox"/> Implementazione del modello numerico (cap. 8) <input type="checkbox"/> Fase di calcolo (cap. 9) <input type="checkbox"/> Calibrazione del modello (cap. 10) <input type="checkbox"/> Validazione del modello (cap. 11) <input type="checkbox"/> Utilizzo del modello come strumento previsionale e analisi di sensibilità sui parametri (cap. 12)	cap. 13
La relazione finale risulta completa e descrive in maniera chiara ed esaustiva tutte le fasi del lavoro svolte?	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO	cap. 13
Sono stati consegnati tutti i file necessari per l'utilizzo del modello da parte del committente? L'utente finale è potenzialmente in grado di riprodurre tutte le simulazioni effettuate dal modellista e citate nella relazione finale?	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO	cap. 13

16 Bibliografia

- Alaska Department of Environmental Conservation. *Fate and Transport Modeling Guidance*. **2017**
- Anderson M.P. and Woessner W.W., *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*, Academic Press, S. Diego, **1992**.
- Anderson, M.P., J.S. Aiken, E.K. Webb and D.M. Mickelson, *Sedimentology and hydrogeology of two braided stream deposits*, *Sedimentary Geology*, 129, 187-199, **1999**.
- Armstrong, M., *Basic linear geostatistics*, Springer Verlag, Berlin , **1998**.
- ASTM D5611-94, *Standard Guide a Sensitivity Analysis for a Ground-Water Model Application*, **2016**.
- ASTM D5880-95, *Standard guide for subsurface flow and transport modelling*, **2006**.
- ASTM D5981 / D5981M - 18 *Standard Guide for Calibrating a Groundwater Flow Model Application*, **2018**
- Baratelli, F., Giudici, M., and C. Vassena, *Single and dual domain models to evaluate the effects of preferential flow paths in alluvial porous sediments*. *Transport in Porous Media* (ISSN: print 0169-3913; on-line 1573-1634), 87, 465-484, DOI:10.1007/s11242-010-9695-4, **2011**
- Baratelli, F., Giudici, M., and Vassena, C. *A sensitivity analysis for an evolution model of the Antarctic ice sheet*. *Reliability Engineering and System Safety* 107, 64–70, **2012**. doi: 10.1016/j.res.2011.07.003
- Baroni, G., and T. Francke. *An effective strategy for combining variance- and distribution-based global sensitivity analysis*. *Environmental Modelling and Software* 134 104851, **2020**
- Barazzuoli P., S. Izzo, P. Menicori, M. Micheluccini, Salleolini M. *A new practical aid to regional hydrogeologic planning: The runoff coefficient map*, *Environmental Management*, 13, 13–622, **1989**. doi: 10.1007/BF01874967
- Barnett et al. *Australian groundwater modelling guidelines*, Waterlines report n. 82, National Water Commission, Canberra, **2012**. ISBN: 978-1-921853-91-3
- Bear J. *Hydraulics of Groundwater*, New York, McGraw-Hill, **1979**. ISBN: 0-486-45355-3
- Bear J. and A. Verruijt, *Modeling Groundwater Flow and Pollution*, Kluwer Acad. Publishers, **1987**. ISBN 978-94-009-3379-8
- Beven K. and J. Freer. *Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology*. *Journal of Hydrology*, 249(1-4), 11-29, **2001**. doi: 10.1016/S0022-1694(01)00421-8
- Boonstra J. and de Ridder N.A. *Numerical modelling of ground water basins – A user oriented manual*. IILRI, P.O. Box. 6700A Wageningen, The Netherlands, Publication No. 29, **1981**, p. 226.
- Bredehoeft J. *The conceptualization model problem—surprise*. *Hydrogeol J* 13, 37–46, **2005**. doi: 10.1007/s10040-004-0430-5
- Bredehoeft J.D. and L.F. Konikow. *Groundwater models cannot be validated. Reply to comment*. *Advances in Water Resources* 15, 371-372, **1992**. doi: 10.1016/0309-1708(92)90004-L
- Carrera J. and S.P. Neumann. *Estimation of aquifer parameter under transient and steady-atate conditions. 1. Maximum likelihood method incorporating prior information*, *Water Resources Research*, 22(2), 199-210, **1986**. doi: 10.1029/WR022i002p00199
- Carrera J., A. Alcolea, A. Medina, J. Hidalgo, L.J. Slooten. *Inverse problem in hydrogeology*. *Hydrogeol J*. 13, 206–222, **2005**. doi: 10.1007/s10040-004-0404-7
- Comincioli V. *Analisi Numerica. Metodi Modelli Applicazioni*, McGraw Hill Libri Italia, Milano, **1990**. ISBN: 8838607176

-
- Comunian A. and M. Giudici. *Hybrid Inversion Method to Estimate Hydraulic Transmissivity by Combining Multiple-Point Statistics and a Direct Inversion Method*. *Mathematical Geosciences* 50(2), 147–167, **2018**. doi: 10.1007/s11004-018-9727-0
- Comunian A. and M. Giudici. *Improving the robustness of the Comparison Model Method for the identification of hydraulic transmissivities*. *Computers & Geosciences*, **2021**. doi: 10.1016/j.cageo.2021.104705
- Dagan G. *Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities: the inverse problem*, *Water Resources Research*, 21(1), 25-72, **1985**. doi: 10.1029/WR021i001p00065
- De Marsily G. *Quantitative Hydrogeology-Groundwater hydrology for engineers*, Academic Press, Orlando, **1986**. ISBN: 0122089162
- De Marsily G., P. Combes, P. Goblet, *Comment on “Groundwater models cannot be validated”, by L.F. Konikow and J.D. Bredehoeft*, *Advances in Water Resources*, **1992**. doi: 10.1016/0309-1708(92)90003-K
- De Marsily G., J-P. Delhomme, F. Delay and A. Buoro, *40 years of inverse problems in hydrogeology*, *Earth and Planetary Sciences*, 329, 73-87, **1999**. doi: 10.1016/S1251-8050(99)80208-0
- Di Salvo, C., N. Guyennon, E. Romano, A.B. Petrangeli, E. Preziosi. *Implementation of a 3D numerical model of a folded multilayer carbonate aquifer*. *Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU2016-16141, 2016
- Doherty J. *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*, 4th ed. Brisbane: Watermark Numerical Computing, **2002**. (<https://www.nrc.gov/docs/ML0923/ML092360221.pdf>)
- Ghasemizadeh, R., F. Hellweger, C. Butscher, A. Alshawabkeh. *Review: Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico*, *Hydrogeology Journal*, 20, 1441–1461, **2012**. doi: 10.1007/s10040-012-0897-4
- Giudici M., G. Morossi, G. Parravicini, G. Ponzini. *A new method for the identification of distributed transmissivities*, *Water Resources Research*, 31(8), 1969-1988, **1995**. doi: 10.1029/95WR01205
- Giudici, M., *Development, calibration and validation of physical models, in Geographic Information Systems and Environmental Modeling* (K. C. Clarke, B. O. Parks e M. C. Krane eds.), 100-121, Prentice-Hall, Upper Saddle River (NJ), ISBN 0130408174, **2001**
- Giudici, M., Ginn, T.R., Vassena, C., Haeri, H., and L. Foglia, *A critical review of the properties of forward and inverse problems in groundwater hydrology, in Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: Credibility of Modelling* (J.C. Refsgaard, K. Kovar, E. Haarder & E. Nygaard eds.), 240-244. IAHS Publ. no. 320, ISBN 9781901502497, **2008**
- Guo, X. and C.M. Zhang, *Hydraulic gradient comparison method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions*, *Ground Water*, 38(6), **2000**. doi: 10.1111/j.1745-6584.2000.tb00679.x
- Hendricks-Franssen H.J., A. Alcolea, M. Riva, M. Bakr, N. van der Wiel, F. Stauffer, A. Guadagnini. *A comparison of seven methods for the inverse modelling of groundwater flow. application to the characterisation of well catchments*. *Adv Water Resour*; 32(6):851–72. **2009**. doi: 10.1016/j.advwatres.2009.02.011
- Hill M.C., *Methods and guidelines for effective model calibration*, USGS Water-Resources Investigation Report 98-4005, **1998**. doi: 10.3133/wri984005
- Hill M.C., F.A. D’Agnese, C.C. Faunt. *Guidelines for model calibration and application to flow simulation in the Death Valley regional groundwater system. Calibration and Reliability in Groundwater Modelling* (Proceedings of the ModelCARE 99 Conference held at Zurich, Switzerland, September 1999). IAHS Publ. no. 265, **2000**
- IRSA-CNR. *Linee Guida per lo sviluppo di modelli numerici di flusso in ambito idrogeologico*. In “Convenzione per la formazione, ricerca e supporto metodologico nel monitoraggio quantitativo
-

-
- delle acque sotterranee mediante implementazione di modellistica idrogeologica tra ARPA Umbria e IRSA-CNR”, **2006**
- ISO - ISO 21365:2019, *Soil quality — Conceptual site models for potentially contaminated sites*, **2019**
- ISPRA *Presentazione dei dati nell’elaborazione di modelli matematici di flusso*, **2013**
- Isaaks E.H. and R.M. Srivastava. *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, **1989**.
- Journel A.G. and C.J. Huijbregts. *Mining Geostatistics*, Academic Press, **1978**.
- Kenessey B. – Lefolyasi tényező és retenció. *Vizugy, Közlemények*, **1930**.
- Klingbeil R., S. Kleineidam, E. Asprion, T. Aigner, G. Teutsch. *Relating lithofacies to hydrofacies: outcrop-based hydrogeological characterisation of quaternary gravel deposits*, *Sedimentary Geology*, 129, 299-310, **1999**. doi: 10.1016/S0037-0738(99)00067-6
- Konikow L.F. and J.D. Bredehoeft. *Ground-water models can not be validated*. *Advances in Water Resources* 15, 75-83, **1992**. doi: 10.1016/0309-1708(92)90033-X
- Mandle R.J., *Groundwater Modeling Guidance*, Michigan Department of Environmental Quality, **2002**.
- McDonald M.G. and A.W. Harbough. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations Book 6, Chapter A1, **1988**.
- Merrick N.P., H. Middlemis, J.B. Ross. *Groundwater Modelling Guidelines for Australia – recommended Procedures for Modelling Reviews*. International Groundwater Conference. Balancing the Groundwater Budget. Northern Territory. Australia, **2002**
- Middlemis H. *Benchmarking best practice for groundwater flow modelling*. Kent Town, South Australia, Australia, **2004**.
- Moore C. and J. Doherty. *The cost of uniqueness in groundwater model calibration*. *Advances in Water Resources* 29(4). 605-623, **2005**. doi: 10.1016/j.advwatres.2005.07.003
- Murray–Darling Basin Commission (MDBC). *Groundwater flow modelling guideline*, report prepared by Aquaterra, **2001**.
- Neumann S.P. *Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple objective decision process under uncertainty*, *Water Resources Research*, 9(4), 1006-1021, **1973**. doi: 10.1029/WR009i004p01006
- Pattle Delamore Partners LTD, *Groundwater model audit guidelines*, prepared for Ministry for the Environment, New Zealand, **2002**.
- Pinder G. *Groundwater modeling using Geographical Information System*, John Wiley and Sons, New York, **2002**. ISBN: 978-0-471-08498-3
- Poeter E.P. and M.C. Hill. *Inverse models: a necessary next step in ground-water modeling*, *Ground Water* 35(2), 250–260, **1997**. doi: 10.1111/j.17456584.1997.tb00082.x
- Poeter E.P. and M.C. Hill. *UCODE, a computer code for universal inverse modeling*, *Computer and Geosciences*, 25, 457-462, **1999**. doi: 10.1016/S0098-3004(98)00149-6
- Pollock, D.W. *User guide for MODPATH Version 7—A particle-tracking model for MODFLOW*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2016–1086, **2016** 35 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20161086>.
- Ponzini G. and A. Lozej. *Identification of the aquifer transmissivities: the comparison method*, *Water Resources Research*, 18(3), 597-622, **1982**. doi: 10.1029/WR018i003p00597
- Rassam D.W., I. Jolly, T. Pickett T. (eWater Cooperative Research Center). *Guidelines for modelling groundwater-surface water interaction in eWater source: towards best practice model applications*, **2012**. ISBN: 978-1-921543-59-3
-

-
- Refsgaard J.C. *State-of-the-art Report on Quality Assurance in modeling related to river basin management*, Harmoniqua Project, **2002**.
- Reilly T.E. and A.W. Harbaugh. *Guidelines for evaluating ground-water flow models*, US Geological Survey, Scientific Investigations Report 2004–5038, **2004**. doi: 10.3133/sir20045038
- Romano E. and E. Preziosi. *The sustainable pumping rate concept: lessons from a case study in Central Italy*. *Ground Water*, 48, 217-226, **2010**. doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00628.x
- Sinclair Knight Merz. *Australian groundwater modelling guidelines: companion to the guidelines*, National Water Commission, Canberra, **2013**.
- Spitz K. and J. Moreno, *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*, John Wiley and Sons, New York, **1996**. ISBN: 978-0-471-13687-3
- Trevor J., T.Godwin, D. McManus, M. Nordberg, H. Shannon, S. Springhorn. *Modeling Best Management Practice*. California Department of Water Resources, **2016**.
- Vassena, C., Durante, C., Giudici, M., and G. Ponzini, *The importance of observations on fluxes to constrain ground water model calibration*. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* (ISSN: print 1474-7065), 33, 1105-1110, DOI:10.1016/j.pce.2008.01.004, **2008**
- Wels C., D. Mackie, J. Scibek. *Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities*. Report no. 194001. Ministry of Environment - Water Protection & Sustainability Branch, **2012**.
- Willing P. *A Nontechnical Guide to Groundwater Modeling*. Natural Resources Defense Council. **2007**.
- Yakowitz S. *Instability in aquifer identification: theory and case studies*, *Water Resources Research*, 16(6), **1980**. doi: 10.1029/WR016i006p01045
- Yeh W. *Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem*, *Water Resources Research*, 22(2), **1986**. doi: 10.1029/WR022i002p00095
- Zheng C. and G. Bennet. *Applied contaminant transport modeling*, Wiley, New York, **1995**. ISBN: 978-0-471-38477-9