

La modellistica matematica
delle acque sotterranee
a supporto della pianificazione e
gestione della risorsa idrica.
Esempi applicativi in Emilia-Romagna

Ing. Andrea Chahoud

Direzione Tecnica ARPAE Emilia-Romagna
Centro Tematico Regionale Sistemi Idrici
Unità Pianificazione Risorsa Idrica

Bologna, 25 novembre 2019



La modellistica matematica
delle acque sotterranee
a supporto della pianificazione e
gestione della risorsa idrica.
Esempi applicativi in Emilia-Romagna

PARTE 2

*Applicazioni modellistiche realizzate in Emilia-Romagna:
elementi comuni nelle fasi di sviluppo ed utilizzo dei modelli*

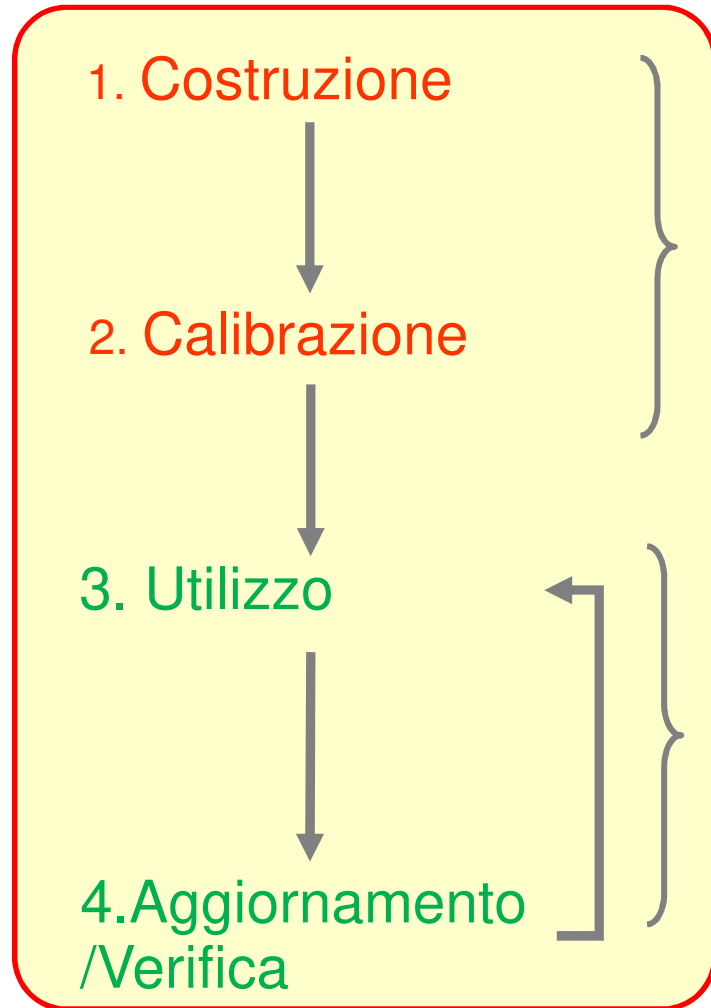
Ing. Andrea Chahoud

Direzione Tecnica ARPAE Emilia-Romagna
Centro Tematico Regionale Sistemi Idrici
Unità Pianificazione Risorsa Idrica

Bologna, 25 novembre 2019



Fasi di sviluppo e utilizzo del modello



COSTRUZIONE DEL MODELLO

- definizione del modello concettuale, della geometria e della struttura del sistema;
- parametrizzazione del modello;
- definizione delle condizioni al contorno;
- dati piezometrici;
- dati sui fiumi;
- dati sui prelievi;
- dati sulle ricariche.

GESTIONE DEL MODELLO

- aggiornamento dei dati (prelievi, ricariche, fiumi) per prolungare il periodo di simulazione coperto dal modello;
- eventuale acquisizione di nuovi dati strutturali/litologici;
- continua riverifica del modello in funzione delle nuove osservazioni disponibili (dati piezometrici).

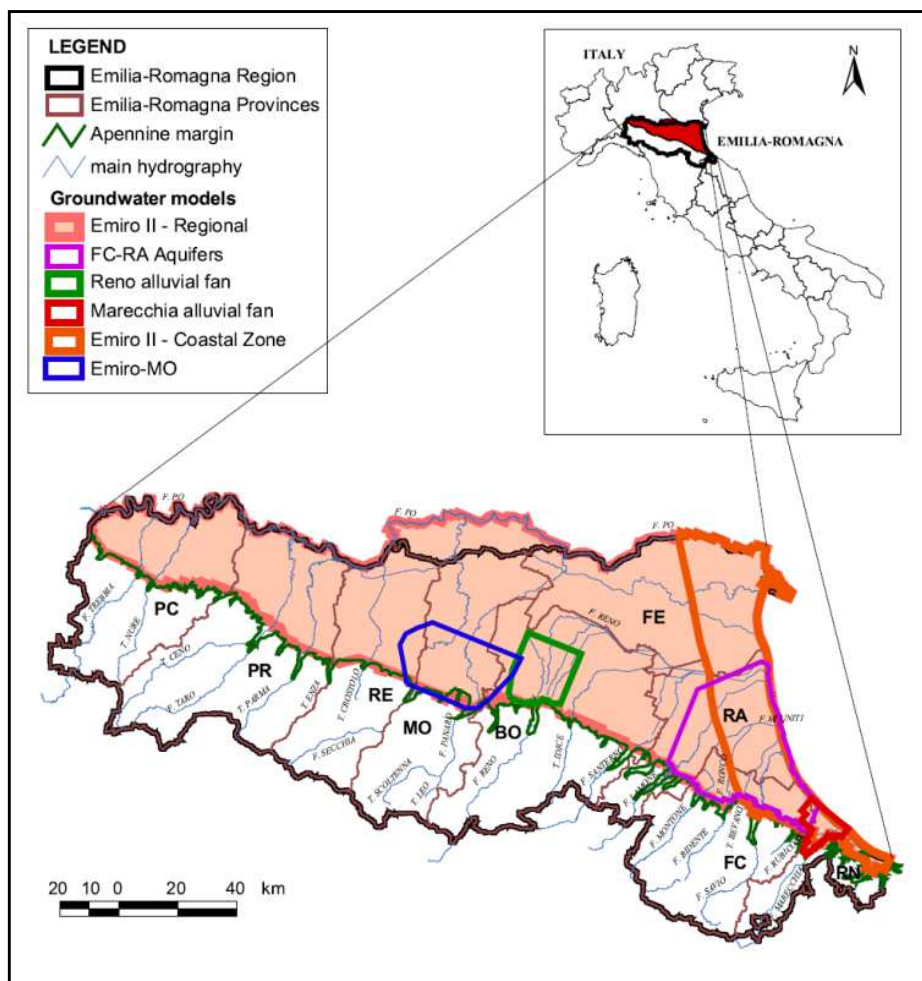
Due approcci a diversa scala spaziale

- ❑ **Modello di flusso delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna, realizzato a supporto del primo Piano di Tutela delle Acque:**
 - Prima implementazione: negli anni 2000,
 - Aggiornamenti successivi: negli anni 2006, 2009 e 2014.
 - Attualmente il modello copre l'arco temporale 2002-2011 (10 anni).
 - Aggiornamento 2019in corso

- ❑ **Modelli di maggior dettaglio (conoide o insiemi di conoidi)**
 - Sviluppo di modelli a scala di maggior dettaglio finalizzati alla gestione della risorsa idrica sotterranea anche in relazione a specifiche problematiche locali : elevati prelievi di acque sotterranee, presenza di nitrati, subsidenza.
 - Tra questi il **modello Reno**, il **modello Marecchia**, ed il **modello delle Conoidi modenesi** hanno subito, dopo l'implementazione iniziale, diversi aggiornamenti con scale temporali e con frequenze diverse.

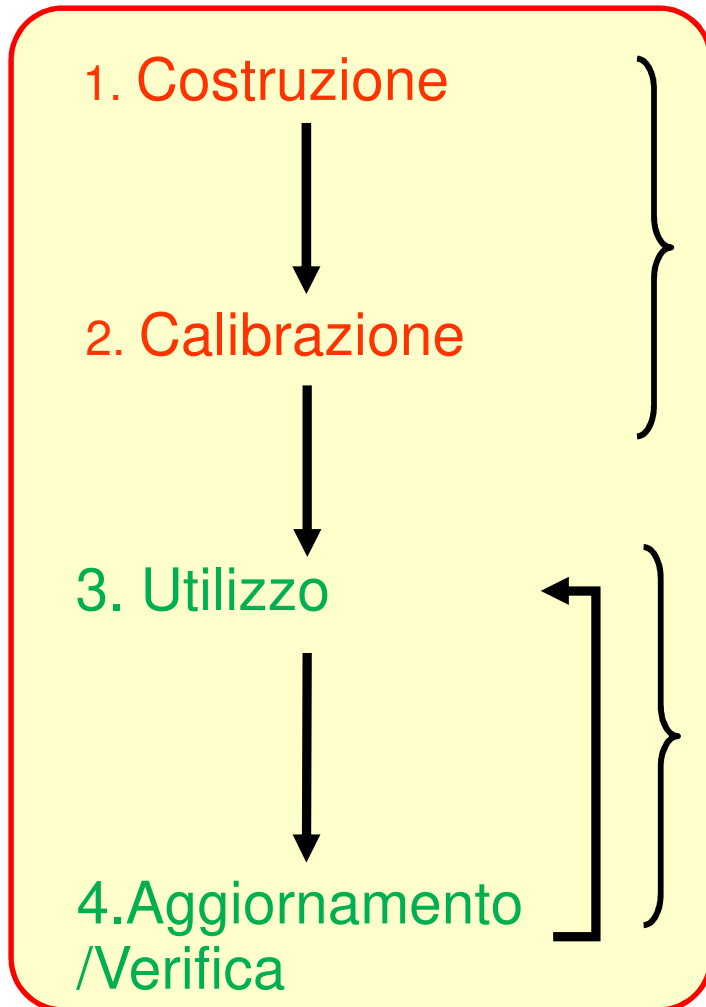
Tutte le attività sono state sviluppate all'interno di progetti finanziati principalmente dalla Regione Emilia-Romagna (Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua, Agenzia Regionale di Protezione Civile, Servizio Difesa del Suolo e della Costa) ma anche da altri Enti (AdB, Hera Rimini, Atersir).

Modelli disponibili e loro aggiornamenti



Modello di flusso	Prima implementazione	Modello associato	Aggiornamenti	Periodo calibrazione
EMIRO-II-Regionale	2003	Nitrati	2007 2009 2014	2003- 2011
Conoide del Reno	2005	Subsidenza	2008	1983-2006
Conoide del Marecchia	2006	Nitrati	Dal 2007 ad oggi	2001-2018
EMIRO-II-Modena	2013	Nitrati	2016	2002-2012
EMIRO-II-Costa	2010	Subsidenza	-	2002-06
Acquiferi FC-RA	2004	-	-	1997-98

L'esperienza nello sviluppo e gestione dei modelli di flusso delle acque sotterranee



SVILUPPO DEL MODELLO

Scelte operative nella fase di sviluppo del modello

GESTIONE DEL MODELLO

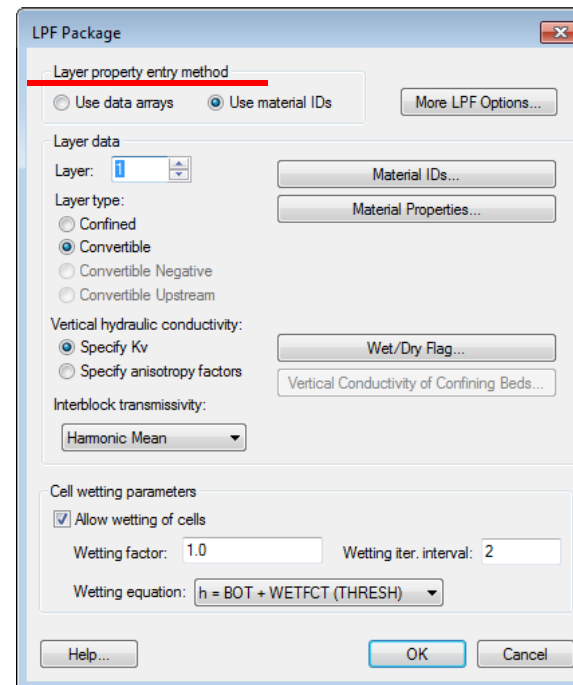
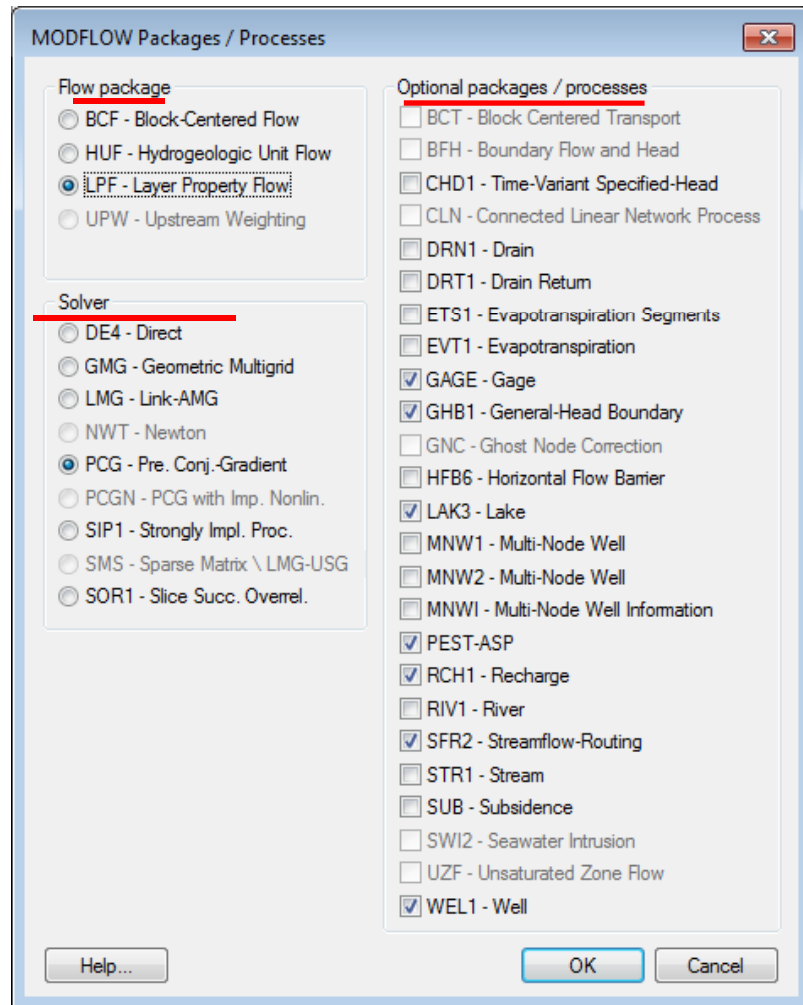
Elementi comuni nella fase di restituzione dei risultati e nelle fasi di aggiornamento e verifica del modello

Scelte operative: il codice di calcolo



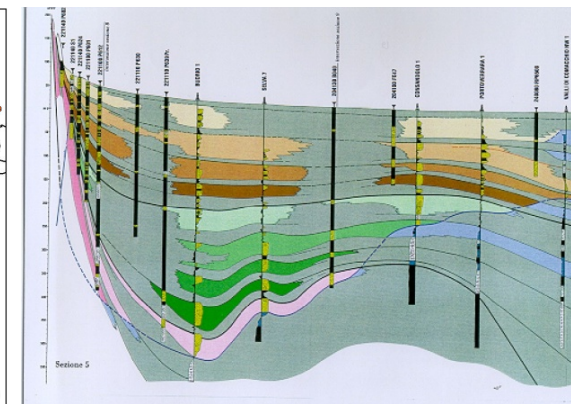
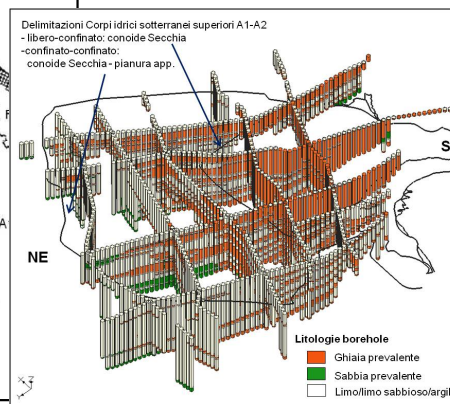
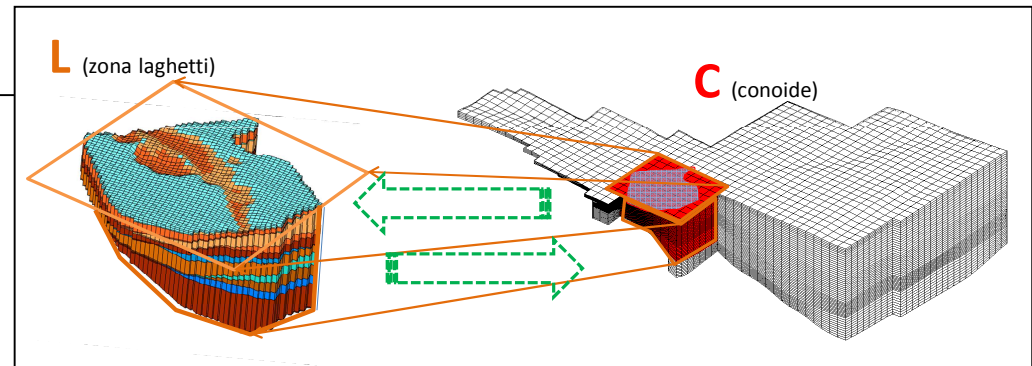
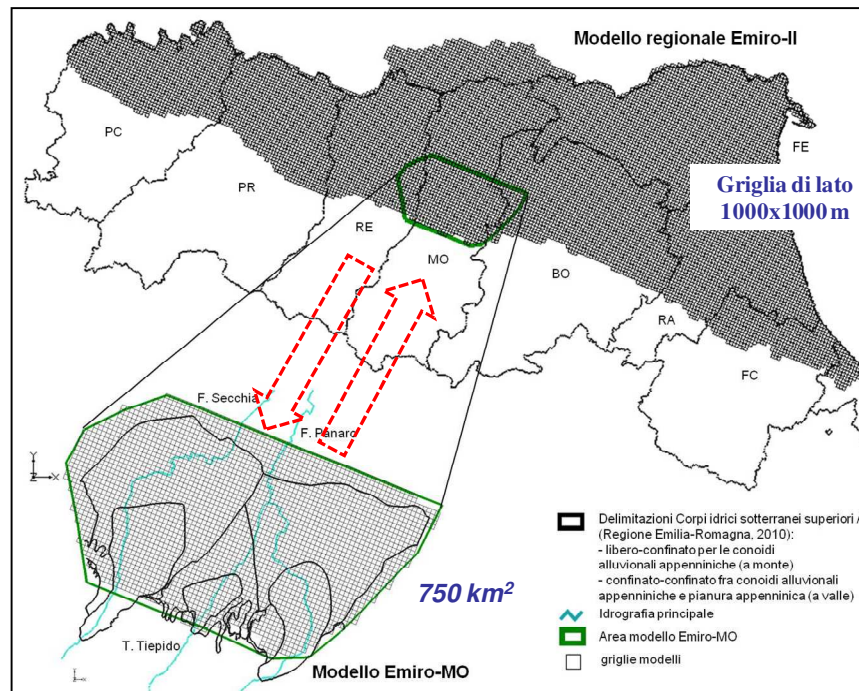
MODFLOW-2000, THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY MODULAR GROUND-WATER MODEL—USER GUIDE TO MODULARIZATION CONCEPTS AND THE GROUND-WATER FLOW PROCESS

- Codice numerico: MODFLOW2000
- Sviluppatore: U.S. Geological Survey
- Categoria: Flusso saturo
- Modulare
- Dimensione: 3-D
- Regime di moto: stazionario/transitorio
- Metodo numerico: differenze finite



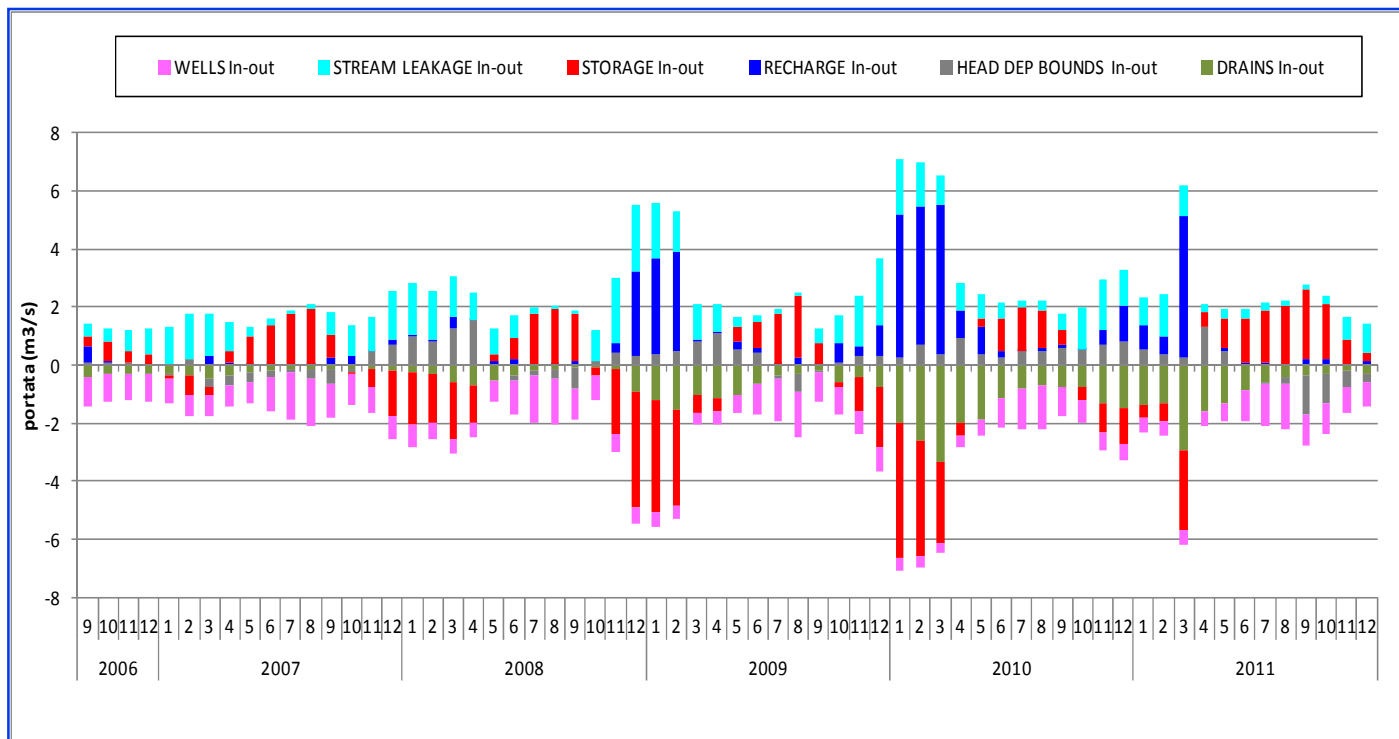
Scelte operative: la struttura 3D

- mantenimento dello stesso modello idrostratigrafico di riferimento per tutti i modelli numerici realizzati;
- possibilità di aggiornamento delle litologie e della struttura del modello, in caso di disponibilità di nuovi dati;
- possibilità di collegamento fra modelli differenti: il modello regionale (“padre”) ed il modello locale (“figlio”), dove il “padre” può ricevere dati dal “figlio” ed il “figlio” può essere inizializzato dal “padre”;
- possibilità di accoppiamento del modello di flusso con altre applicazioni (es. trasporto di inquinanti).



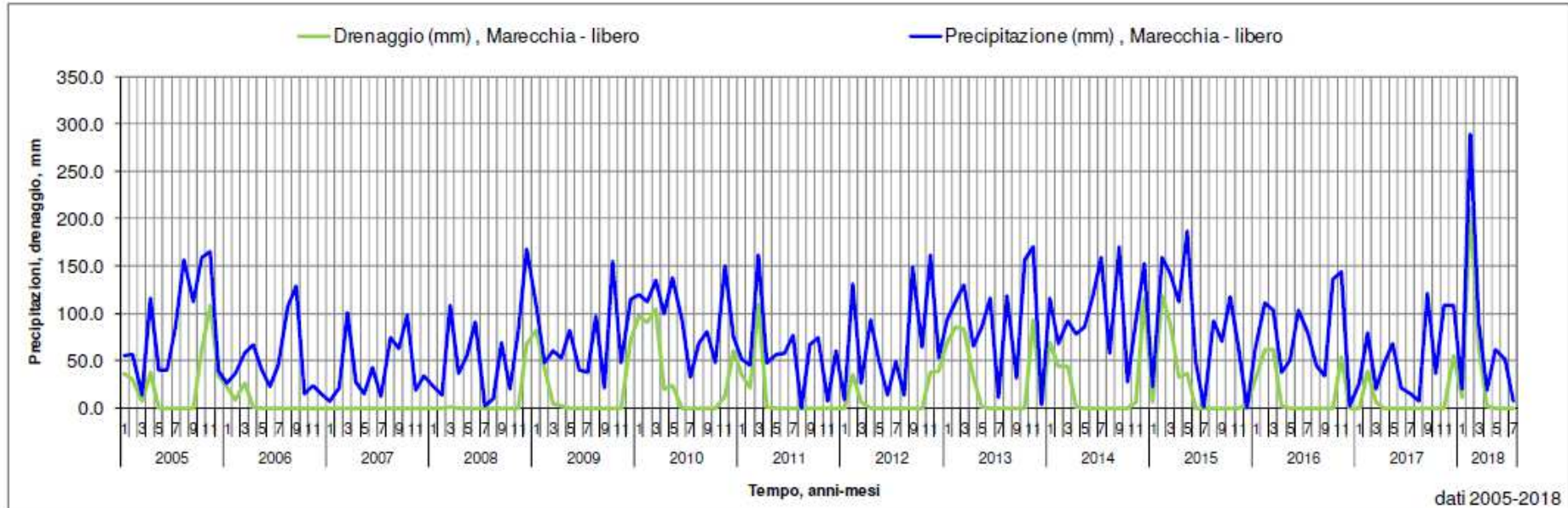
Scelte operative: regime di moto transitorio

- ❑ necessità di valutare i cambiamenti dell'immagazzinamento di acqua sotterranea (analisi del bilancio idrico);
- ❑ diverse scelte delle lunghezze dei periodi di calibrazione e simulazione del modello numerico.



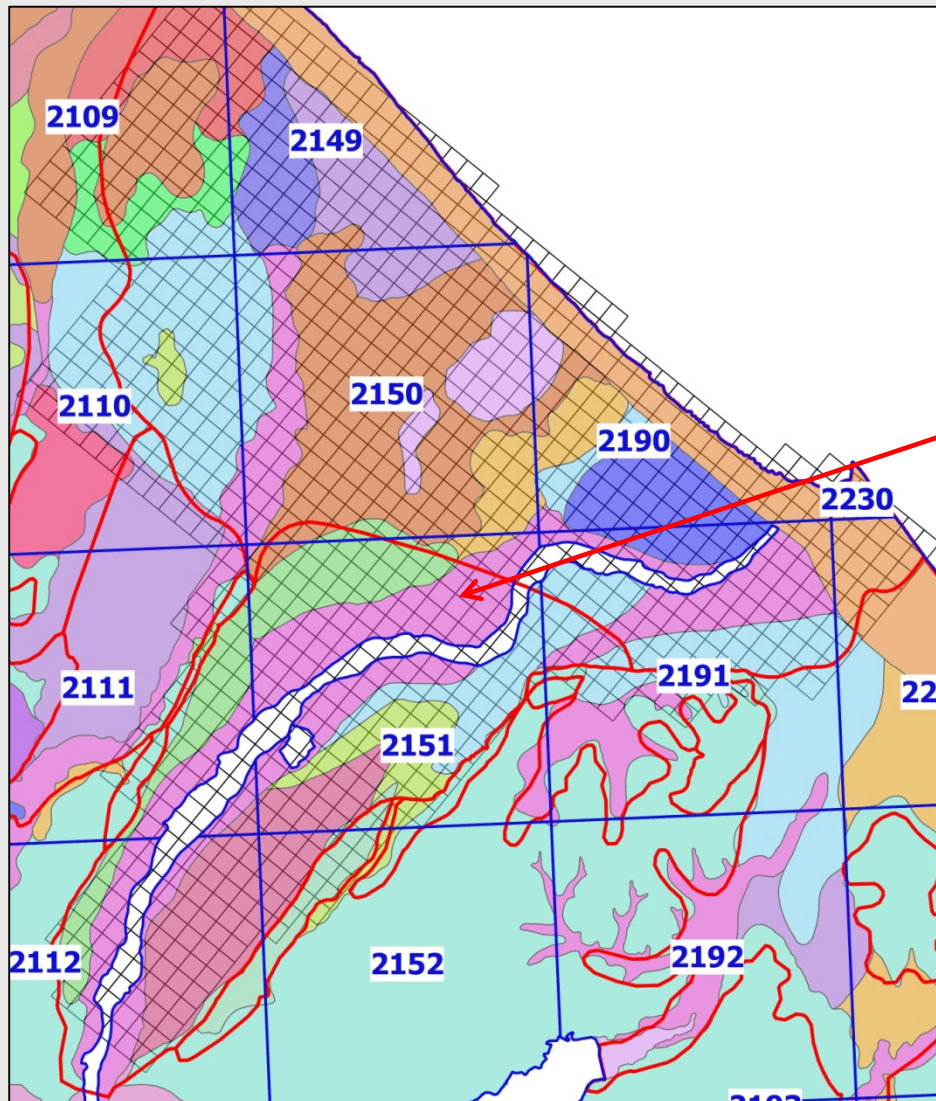
Scelte operative: calcolo della ricarica da pioggia

- ❑ In tutte le applicazioni viene utilizzato CRITERIA, modello di bilancio idrico del suolo sviluppato da ARPAE-SIMC;
- ❑ calcola il drenaggio giornaliero in uscita dai primi metri di suolo (termine di ricarica);
- ❑ tiene conto delle diverse caratteristiche tessiturali dei suoli e delle rotazioni colturali applicate;
- ❑ è costantemente aggiornato con i dati delle precipitazioni in quanto è principalmente utilizzato per scopi agro-metereologici da ARPAE-SIMC;



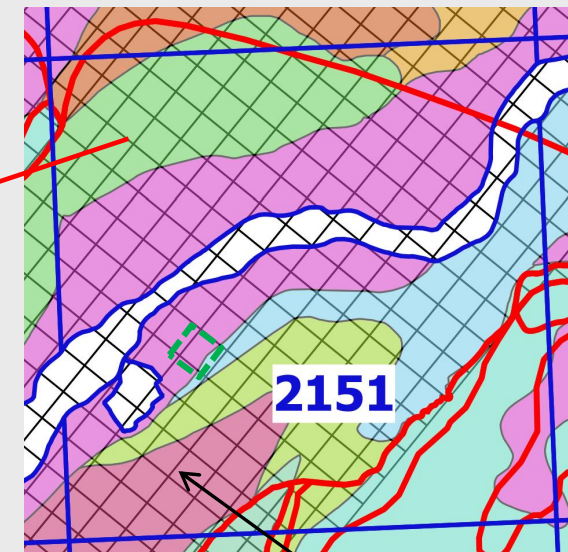
Contributo meteorico alla ricarica delle falde

Elaborazione con Criteria, prato di graminacee, no irrigazione, drenaggio giornaliero riaggregato su base mensile (Stress periods di Modflow)



Cella Meteo P (x,y,t) , T(x,y,t)

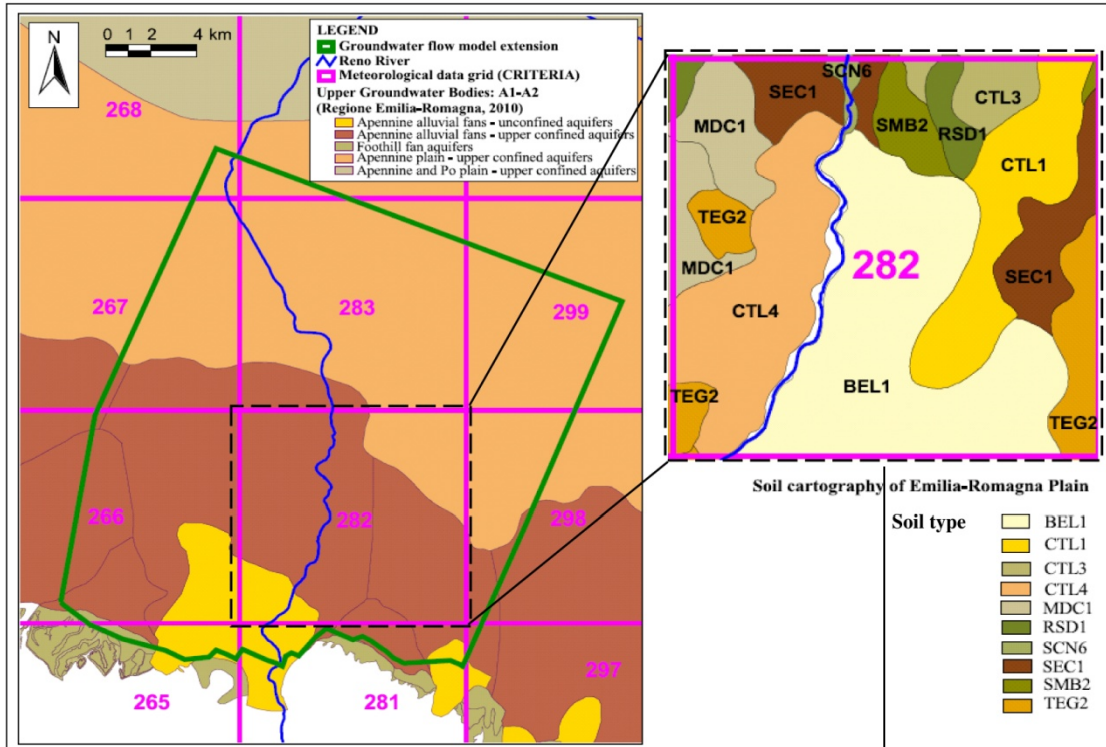
Dimensione 5 x 5 km



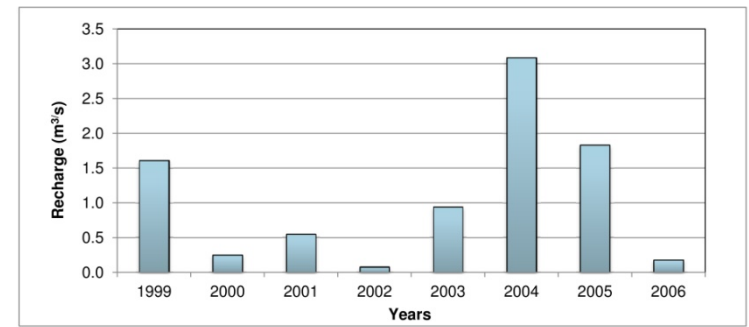
Cella Modflow RCH (x,y,t)

Dimensione 350x350 m

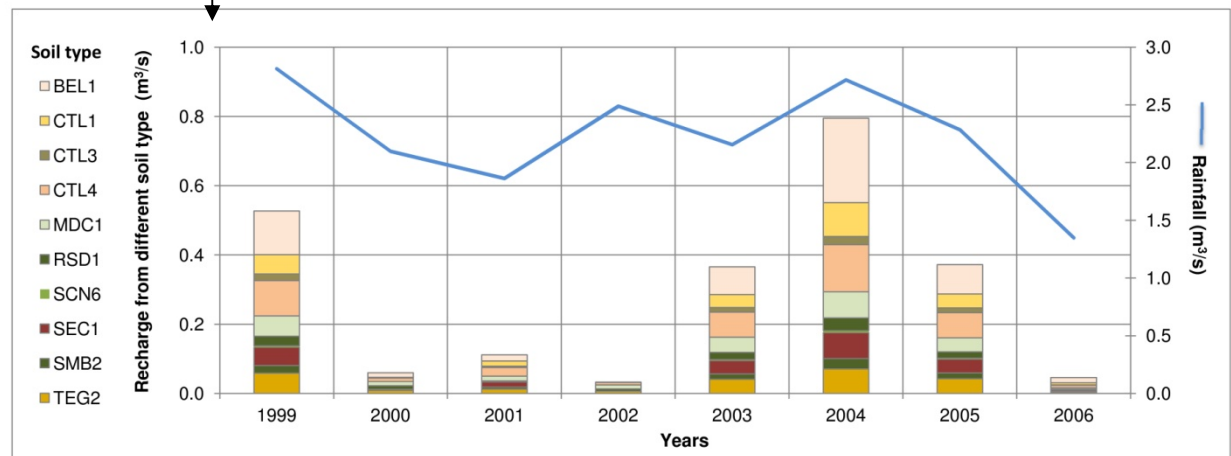
Contributo meteorico alla ricarica delle falde, la procedura operativa



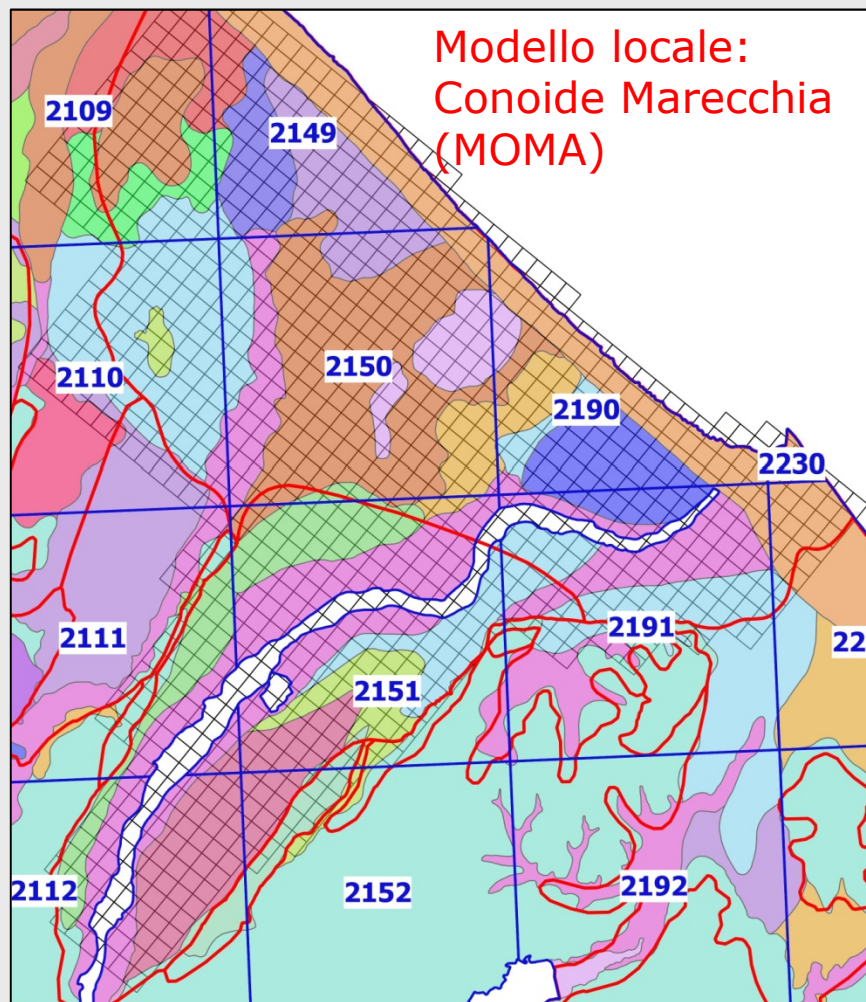
Stima della ricarica per l'intero modello



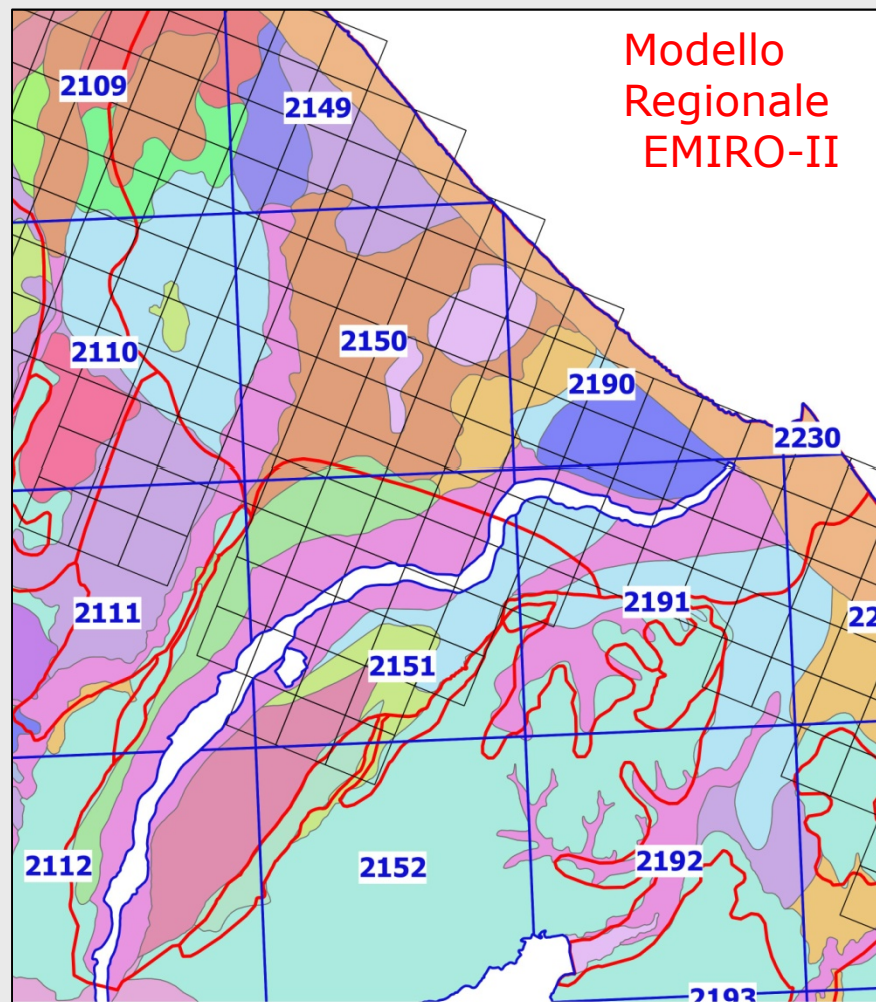
CRITERIA (ARPAE-SIMC): modello di bilancio idrico del suolo, esempio di applicazione per il modello Conoide Reno.



Possibilità di applicazione per modelli numerici a scale diverse



Cella Modflow RCH (x,y,t)
Dimensione 350x350 m



Cella Modflow RCH (x,y,t)
Dimensione 1x1 km

MODULO RCH di MODFLOW

MODFLOW Packages / Processes

Optional packages / processes

- BCT - Block Centered Transport
- BFH - Boundary Flow and Head
- CHD1 - Time-Variant Specified-Head
- CLN - Connected Linear Network Process
- DRN1 - Drain
- DRT1 - Drain Return
- ETS1 - Evapotranspiration Segments
- EVT1 - Evapotranspiration
- GAGE - Gage
- GHB1 - General-Head Boundary
- GNC - Ghost Node Correction
- HFB6 - Horizontal Flow Barrier
- LAK3 - Lake
- MNW1 - Multi-Node Well
- MNW2 - Multi-Node Well
- MNWI - Multi-Node Well Information
- PEST-ASP
- RCH1 - Recharge
- RIV1 - River
- SFR2 - Streamflow-Routing
- STR1 - Stream
- SUB - Subsidence
- SWI2 - Seawater Intrusion
- UZF - Unsaturated Zone Flow
- WEL1 - Well

OK Cancel

Recharge includes only that portion of the precipitation that actually reaches the water table.

Recharge is not the same as precipitation.

Evapotranspiration from the unsaturated zone is not included in recharge.

Dimensione del dato: 2D (m/s)

- 1—Recharge is only to the top grid layer.
- 2—Vertical distribution of recharge is specified in layer variable IRCH.
- 3—Recharge is applied to the highest active cell in each vertical column.

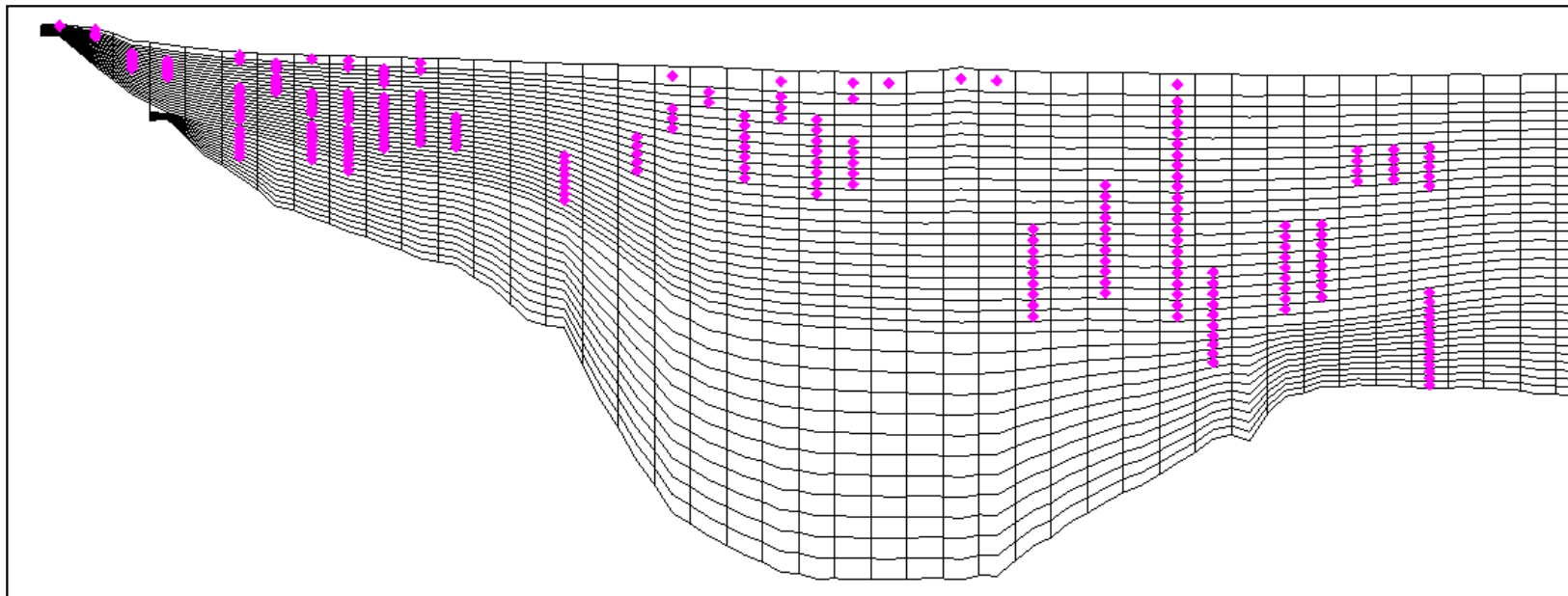
Recharge may also include flow into groundwater from streams or rivers if that flow is not included in the model in some other way (es. Moduli River o Stream di Modflow).

N.B: nelle applicazioni realizzate il rapporto falda fiume è stato inserito nel modello numerico in maniera diversa a seconda della scala del modello e dei dati disponibili.

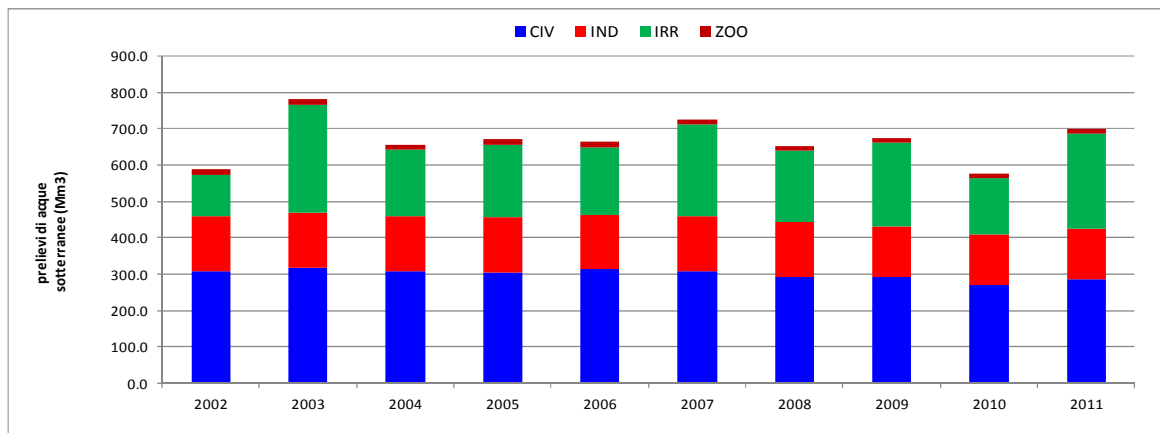
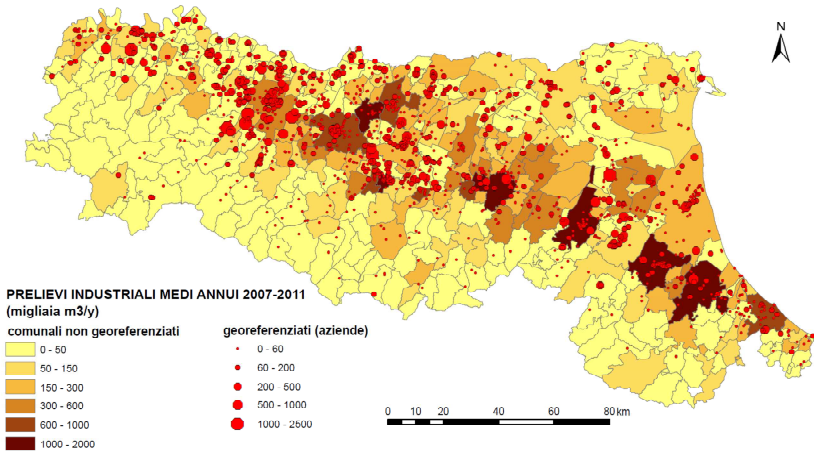
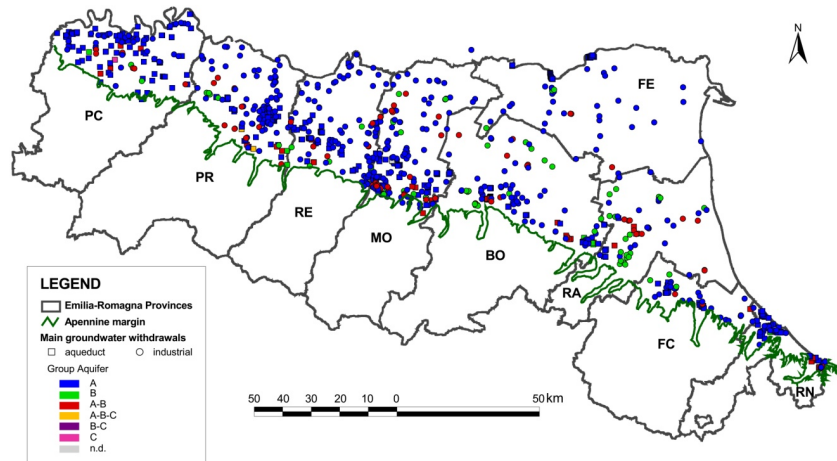
Scelte operative: valutazione dei prelievi di acque sotterranee

- ❑ è richiesta la conoscenza dei volumi d'acqua estratti nel tempo;
- ❑ è richiesta la conoscenza dell'ubicazione nello spazio 3D dei pozzi in prelievo (longitudine, latitudine, profondità e posizione dei filtri);
- ❑ i prelievi acquedottistici sono conosciuti, come pure gli "industriali Aziende", mentre gli industriali e gli agro-zootecnici sono stimati;

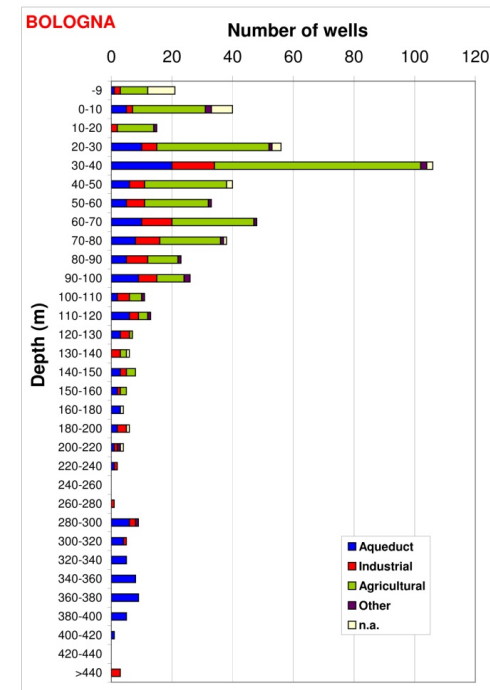
Dimensione del dato: 3D



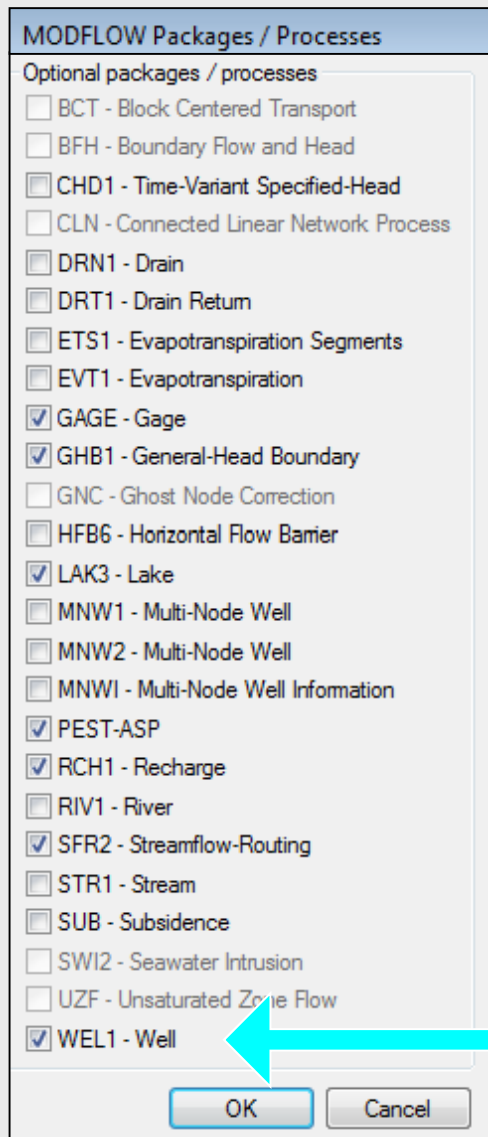
Scelte operative: valutazione dei prelievi di acque sotterranee



USO	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
CIVILE	307.4	317.6	308.2	305.4	313.4	308.6	291.7	292.1	270.8	286.5
INDUSTRIALE	150.5	150.5	150.9	150.5	150.5	150.5	150.9	137.9	137.9	137.9
IRRIGUO	116.4	297.6	182.7	198.8	184.7	253.0	196.5	231.4	156.0	262.7
ZOOTECNICO	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6
Totale complessivo	589.1	780.6	656.6	669.5	663.4	723.6	650.8	673.0	576.3	698.8



MODULO WELL di MODFLOW



MODFLOW Packages / Processes

Optional packages / processes

- BCT - Block Centered Transport
- BFH - Boundary Flow and Head
- CHD1 - Time-Variant Specified-Head
- CLN - Connected Linear Network Process
- DRN1 - Drain
- DRT1 - Drain Return
- ETS1 - Evapotranspiration Segments
- EVT1 - Evapotranspiration
- GAGE - Gage
- GHB1 - General-Head Boundary
- GNC - Ghost Node Correction
- HFB6 - Horizontal Flow Barrier
- LAK3 - Lake
- MNW1 - Multi-Node Well
- MNW2 - Multi-Node Well
- MNWI - Multi-Node Well Information
- PEST-ASP
- RCH1 - Recharge
- RIV1 - River
- SFR2 - Streamflow-Routing
- STR1 - Stream
- SUB - Subsidence
- SWI2 - Seawater Intrusion
- UZF - Unsaturated Zone Flow
- WEL1 - Well

OK Cancel

The Well package is used to simulate a specified flux (Q) to individual cells and specified in units of **length³/time**.

Dimensione del dato: 3D (m³/s)

K- Layer - is the layer number of the model cell that contains the well.

I - Row - is the row number of the model cell that contains the well.

J - Column - is the column number of the model cell that contains the well.

Q :is the volumetric recharge rate.

- positive value indicates recharge
- negative value indicates discharge (pumping).

Attenzione: Modflow non gestisce le unità di misura!
Le unità di misura dei dati in ingresso devono essere coerenti sin dall'inizio

Scelte operative: elementi comuni per l'impostazione dell'analisi modellistica e la restituzione dei risultati

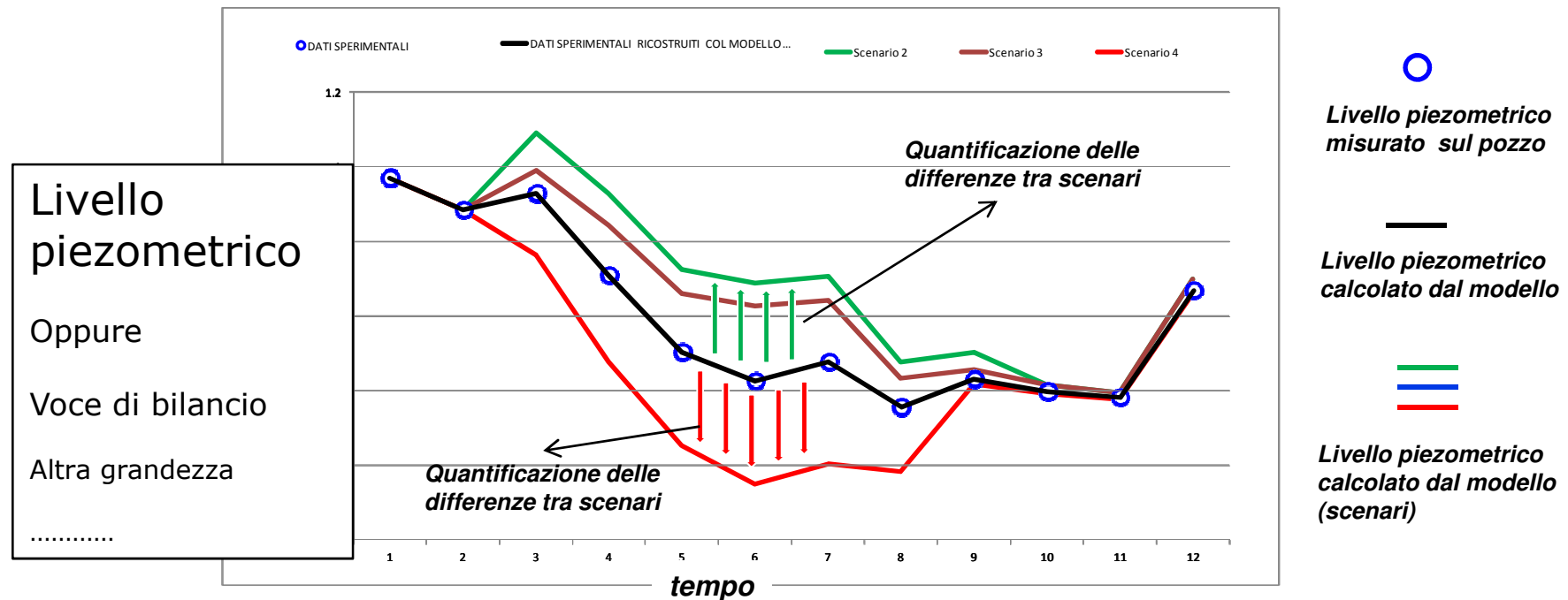
- ❑ Gli OUTPUT del modello di flusso (generalmente carichi idraulici e bilanci) possono essere aggregati nello spazio e nel tempo in funzione degli obiettivi dell'analisi;
- ❑ in molti casi può essere richiesto il confronto tra risultati di più simulazioni di scenario
- ❑ sforzi devono essere dedicati alla comunicazione dei risultati in maniera semplice ed efficace
- ❑ in questo modo è possibile fornire il necessario supporto ai decision-makers

Simulazioni di scenario dedicate

Elaborazioni del modello numerico

I dati sperimentali si riferiscono all'assetto corrente dell'acquifero che il modello numerico è in grado di ricostruire

La modellistica permette di ricostruire diverse situazioni attraverso ipotesi di scenario (ad es. variazioni della portata della ricarica controllata, maggiori prelievi, minor ricarica da periodo siccitoso,.....)



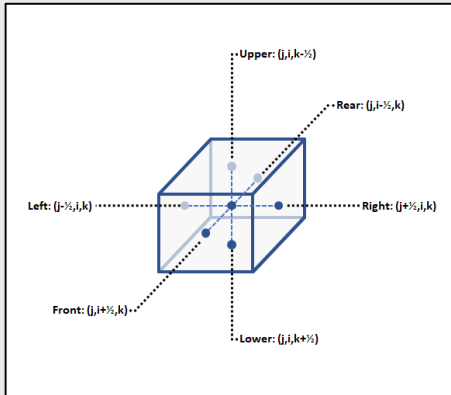
Valutazione dello stato della risorsa idrica sotterranea: il bilancio idrogeologico

Il modello numerico restituisce il bilancio complessivo del sistema o di parti di esso, per ogni periodo della discretizzazione temporale adottata.

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 54			
CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
----		----	
STORAGE =	175012912.0000	STORAGE =	8.0111E-02
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	211998720.0000	HEAD DEP BOUNDS =	2.0129
RECHARGE =	407792480.0000	RECHARGE =	1.0571
TOTAL IN =	794804096.0000	TOTAL IN =	3.1501
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	178389072.0000	STORAGE =	0.6233
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	264884032.0000	WELLS =	0.5036
HEAD DEP BOUNDS =	350446048.0000	HEAD DEP BOUNDS =	2.0232
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	793719168.0000	TOTAL OUT =	3.1501
IN - OUT =	1084928.0000	IN - OUT =	3.9577E-05
PERCENT DISCREPANCY =	0.14	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Vengono quantificate tutte le voci costituenti il bilancio globale: le diverse condizioni al contorno (prelievi, ricariche, BC) e gli immagazzinamenti (storage).

Le variazioni degli immagazzinamenti: come vengono contabilizzate nel bilancio



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

END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 54

RATES FOR THIS TIME STEP

L**3/T

IN:

STORAGE =	8.0111E-02
CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	2.0129
RECHARGE =	1.0571
TOTAL IN =	3.1501

OUT:

STORAGE =	0.6233
CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.5036
HEAD DEP BOUNDS =	2.0232
RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3.1501
IN - OUT =	3.9577E-05
PERCENT DISCREPANCY =	0.00

STORAGE IN: volumi di acqua persi dal sistema in corrispondenza degli abbassamenti piezometrici

STORAGE OUT: volumi di acqua effettivamente immagazzinati nel sistema in corrispondenza degli innalzamenti piezometrici

I campi di applicazione

Le applicazioni modellistiche realizzate sono state utilizzate in diversi ambiti:

- Miglioramento e verifica delle conoscenze idrogeologiche
- Pianificazione risorsa idrica
- Gestione della risorsa idrica sotterranea
- Supporto alla gestione di una crisi idrica
- Ricarica controllata delle falde

Vediamo alcuni esempi