

# MODELLO NUMERICO DI FLUSSO DEL BACINO IDROGEOLOGICO DELLA CONOIDE ALLUVIONALE DEL FIUME TARO (REGIONE EMILIA-ROMAGNA, ITALIA SETTENTRIONALE): SIMULAZIONE DEGLI SCAMBI IDRICI TRA FIUME E ACQUIFERI

## MODELLING GROUNDWATER-STREAM WATER INTERACTIONS IN THE TARO RIVER HYDROGEOLOGICAL BASIN (WESTERN EMILIA-ROMAGNA REGION, NORTHERN ITALY)

GIANMARCO DI DIO<sup>(\*)</sup>

<sup>(\*)</sup>Servizio Tecnico dei Bacini degli Affluenti del Po - Via Garibaldi 75 - 43123 Parma, Italy  
E-mail: gdidio@regione.emilia-romagna.it

### RIASSUNTO

Il Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del fiume Taro (BICAT) è un sistema idrologico impostato su un edificio sedimentario di origine alluvionale incluso nel Bacino Quaternario del Fiume Po e situato nella parte occidentale della Regione Emilia-Romagna, tra il margine dell'Appennino Settentrionale ed il Fiume Po. La porzione di bacino satura di acque dolci ha uno spessore compreso tra pochi metri ed oltre settecento metri. Per sostenere le attività economiche e le richieste di acqua potabile della popolazione residente nella Provincia di Parma, ogni anno si sottraggono al BICAT circa 90 Mm<sup>3</sup> di acqua di falda e 50 Mm<sup>3</sup> di acqua superficiale. Allo scopo di valutare la sostenibilità di tali prelievi è stato creato un modello matematico 3D del BICAT in cui un modello a elementi finiti 3D di sottosuolo è accoppiato, tramite condizioni al contorno di Cauchy, ad un modello ad elementi finiti 1D del sistema idrologico superficiale Taro-Po. Questo modello è stato calibrato direttamente in stato non stazionario, simulando i flussi idrici superficiali e sotterranei nel periodo maggio 2005 - ottobre 2006. L'accoppiamento del modello 3D di sottosuolo con quello 1D di superficie ha permesso di mappare in modo affidabile le zone di scambio fiume-falda e di valutare la ricarica degli acquiferi nelle più svariate condizioni di deflusso fluviale.

**TERMINI CHIAVE:** acque superficiali, acquiferi, ricarica, modello numerico 3D

### INTRODUZIONE

Il Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del fiume Taro (BICAT) è un sistema idrologico impostato su un edificio sedimentario di origine deltizia ed alluvionale incluso nel Bacino del Fiume Po, ampia conca sedimentaria, subsidente, delimitata a cintura dai rilievi appenninici ed alpini e colmata da un potente accumulo di depositi marini ed alluvionali di età quaternaria. Il BICAT è situato nella parte occidentale della Regione Emilia-Romagna e si estende in superficie per circa 560 km<sup>2</sup> tra il margine dell'Appennino Settentrionale a sud ed il Fiume Po a nord (Fig. 1). Dal punto di vista geomorfologico esso comprende la Conoide Alluvionale del Fiume Taro e la Pianura Alluvionale Padana prospiciente.

Lo studio geologico e idrostratigrafico del BICAT è stato condotto dal Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna nel de-

### ABSTRACT

The Taro River Hydrogeological Basin (TRHB) is a small fan-delta and alluvial fan depositional systems water bearing stack included in the Quaternary Po River Basin and located in the Western Emilia-Romagna Region of Italy, between the margin of the Northern Apennines and the Po River. The thickness of the fresh water bearing, part of TRHB, ranges from a few meters to more than seven hundred meters. Almost 90 Mm<sup>3</sup> of groundwater and 50 Mm<sup>3</sup> of stream water are yearly subtracted from the TRHB to sustain economic activities and drinking water demand of Parma Province population. A 3D mathematical model of TRHB has been built to evaluate the long-term sustainability of this consumption. The subsurface 3D finite element model is coupled via Cauchy type boundary conditions to a 1D finite element model of the Taro and Po rivers. This model of TRHB has been directly calibrated under transient-state conditions, simulating groundwater seepage and stream flows in the period between May 20<sup>th</sup> 2005 and October 31<sup>st</sup> 2006. Coupling of the 3D subsurface model with the 1D surface model led to a reliable assessment of stream-aquifer connectivity, aquifer recharge and mapping of exchange areas under the most various stages of the river flow.

**KEY WORDS:** groundwater, stream water, aquifer recharge, 3D modelling

### INTRODUCTION

The Taro River Hydrogeological Basin (TRHB) is a hydrologic system based on a relatively small stack of fan-delta and alluvial fan depositional systems included in the Po River Basin, large subsiding sedimentary trough bordered by alpine orogenic reliefs and filled by huge amounts of Quaternary marine and alluvial deposits. It is located in the Western Emilia-Romagna Region of Italy (Fig. 1), where it covers a surface extension of about 560 km<sup>2</sup>. Geomorphologically speaking, it embraces the Taro River Alluvial Fan and the facing Po River Plain.

The study of the TRHB has been conducted during the decade 1995-2005 by the Geological Survey of Emilia Romagna as a local deepening of a former regional study about geology, sequence stratigraphy and groundwater resources of the Quaternary depo-

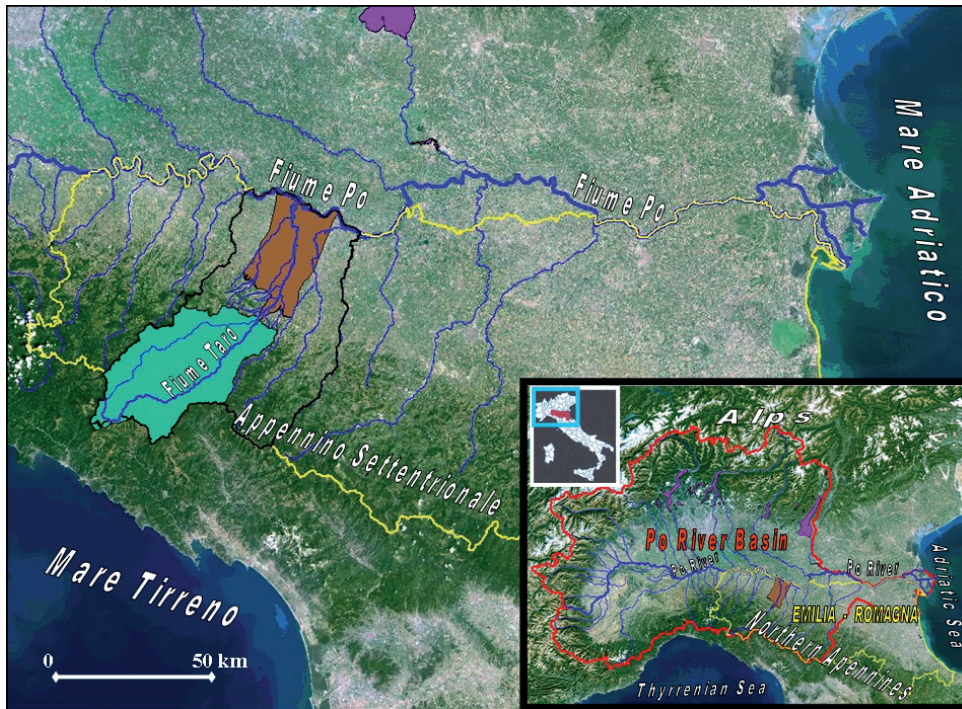


Fig. 1 - Inquadramento geografico dell'area di studio. In giallo il confine della Regione Emilia-Romagna; in nero il confine della Provincia di Parma. L'area marrone individua il Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del fiume Taro; l'area verde individua il Bacino Imbrifero Montano del fiume Taro

- Geographic framework of the study area. In yellow the boundary of Emilia-Romagna Region comprised in Northern Italy; in black the boundary of Parma Province. The brown area identifies the Taro River Hydrogeological Basin; the green area identifies the Taro River Mountain Watershed

cennio 1995-2005, come approfondimento di uno studio sulle riserve idriche sotterranee, regionali, intrapreso per aggiornare le conoscenze sulla materia, ferme dalla fine degli anni 70 (ENI, 1972; VENZO, 1973; PETRUCCI *et alii*, 1975; REGIONE EMILIA-ROMAGNA/IDROSER, 1978). Nel corso degli anni, l'interpretazione stratigrafica del sottosuolo, risultato dell'integrazione delle metodologie fisico-stratigrafiche e sedimentologiche, tipiche della ricerca petrolifera degli ultimi 30 anni, con le metodologie più tradizionali di derivazione geomorfologica e pedologica, si è concretizzata in un modello evolutivo tridimensionale, stratigrafico ed idrogeologico, dell'intero Bacino del Fiume Po (DI DIO, 1996; DI DIO *et alii*, 1997; DI DIO, 1998; REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP, 1998; REGIONE LOMBARDIA & ENI DIVISIONE AGIP, 2001; DI DIO, 2005). La figura 2 illustra lo schema stratigrafico ed idrostratigrafico del BICAT derivante da tali studi.

La base del sistema idrologico è costituita dai depositi fini, impermeabili, di origine marina e di età pleistocenica inferiore, ascrivibili al Sintema del Torrente Stirone. Il limite settentrionale del BICAT è costituito dalla proiezione verticale di un tratto di Fiume Po lungo 25.64 km, mentre il suo confine meridionale è rappresentato in parte dall'affioramento della base del Sintema di Costamezzana, lungo il Margine dell'Appennino Settentrionale, ed in parte dall'apice della conoide alluvionale del Fiume Taro (Fig. 3). Il confine occidentale dell'area di studio corre lungo l'allineamento dei centri abitati di Fidenza, Soragna e Pieveottoville, proprio in corrispondenza del limite orientale della Conoide Alluvionale del Torrente Stirone, affluente di sinistra del Fiume Taro. Il confine orientale dell'area di studio corre

situational systems and as an upgrade of the knowledge in that field acquired in the 70's (ENI, 1972; VENZO, 1973; PETRUCCI *et alii*, 1975; REGIONE EMILIA-ROMAGNA/IDROSER, 1978). Merging the sequence-stratigraphic approach, typical of petroleum exploration, with the pedologic approach followed by geomorphologists, this regional study resulted in a new evolutionary model, both stratigraphic and hydrogeologic, of the whole Po River Basin (DI DIO, 1996; DI DIO *et alii*, 1997; DI DIO, 1998; REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP, 1998; REGIONE LOMBARDIA & ENI DIVISIONE AGIP, 2001; DI DIO, 2005). Figure 2 shows the stratigraphic and hydrostratigraphic framework of TRHB ensuing those studies.

If we consider the 3D hull of the TRHB, the base of the hydrologic system is constituted by the fine-grained, impervious, Lower Pleistocene marine deposits of the Torrente Stirone Synthem. Its northern boundary is represented by the vertical section of a 25.64 km long stretch of the Po River, while its southern boundary is represented in part by the outcrop of the bottom surface of the Costamezzana Synthem and in part by the Taro River Fan apex (Fig. 3). The western boundary of the solid hull is a vertical section running along the alignment of the Fidenza, Soragna and Pieveottoville villages, in correspondence to the eastern boundary of the Stirone River Alluvial Fan. The eastern boundary of the studied terrain volume is a vertical section running first along the Baganza River for 5 km and then, towards NNE, up to the Colorno village along the western boundary of the Baganza and Parma Rivers Alluvial Fans.

At the Fan apex the Taro River waters come out of the mountain

U	S	GA	CA	L
AES8	UPL 0.126 Ma	A	A0	1
AES7			A1	2
AES3			A2	3
AES2			A3	4
AES1			A4	5
AEI	MPL	B	B1	6
			B2	7
			B3	8
			B4	9
CMZ	0.781 Ma	C	C1	10
			C2	11
			C3	12
			C4	13
ATS	LPL			14
				15
				16
				17
				18
	1.806 Ma			

Fig. 2 - Schema stratigrafico, idrostratigrafico e discretizzazione verticale del Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del fiume Taro (modificato da Di Dio et Al., 2005). LEGENDA: U: Unità Stratigrafico-Deposizionali; S: Scala Cronostratigrafica; GA: Gruppo Acquifero; CA: Complesso Acquifero; L: Livelli di discretizzazione verticale del modello 3D; ATS: Sintema del Torrente Stirone; CMZ: Sintema di Costamezzana; AEI: Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore; AES: Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore; LPL: Pleistocene Inferiore; MPL: Pleistocene Medio; UPL: Pleistocene Superiore - Olocene

- Stratigraphic and hydrostratigraphic framework of Taro River Hydrogeological Basin (modified by Di Dio et alii, 2005). LEG-  
END: U: Stratigraphic-Depositional Units; S: Chronostratigraphic Scale (in My); GA: Aquifer Group; CA: Aquifer Complex; L: Layers of the 3D mathematical model; ATS: Torrente Stirone Synthem; CMZ: Costamezzana Synthem; AEI: Lower Emiliano-Romagnolo Synthem; AES: Upper Emiliano-Romagnolo Synthem; LPL: Lower Pleistocene; MPL: Middle Pleistocene; UPL: Upper Pleistocene - Holocene

per circa 5 km lungo l'alveo del Torrente Baganza, quindi continua verso NNE seguendo il limite occidentale delle Conoidi Alluvionali dei Torrenti Baganza e Parma, posto approssimativamente lungo l'allineamento dei centri abitati di Felino, Parma e Colorno.

In corrispondenza dell'apice della conoide, le acque del Fiume Taro escono dal Bacino Imbrifero Montano, caratterizzato da

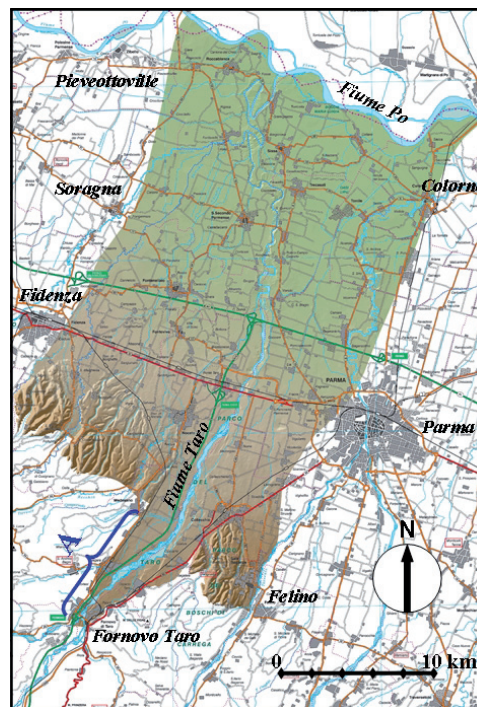


Fig. 3 - Mappa del Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del fiume Taro. A: Zona di Trasferimento  
- Map of Taro River Hydrogeological Basin. A: Transfer Zone

watershed, characterized by a catchment area of 1246.21 km<sup>2</sup> and a mean elevation of 730 m a.m.s.l., and enter the hydrogeological basin through a Transfer Zone, i.e. a zone without surface water and groundwater reservoirs (Fig. 3).

The thickness of the fresh water bearing part of TRHB, object of this study, is therefore very variable, ranging from a few meters along the Apennine Piedmont border and in the Transfer Zone to more than seven hundred meters underneath the confluence of Taro and Po rivers. The total terrain volume exceeds 200'000 Mm<sup>3</sup> while the fresh groundwater resources exceed 20'000 Mm<sup>3</sup>.

Many important agro-industrial companies are concentrated in the study area. Almost 90 Mm<sup>3</sup> of groundwater are yearly subtracted from the TRHB to sustain economic activities and drinking water demand of Parma Province population. Moreover, every summer in the Transfer Zone 50 Mm<sup>3</sup> of stream water are derivated from the Taro River for irrigation purposes, generating huge environmental impacts. It's evident that integrated management of surface water and groundwater is essential to ensure sustainability of the water resource. To evaluate and plan out the long-term sustainability of this consumption, through the deep understanding of the recharging capabilities of the hydrogeological basin, the Emilia-Romagna Regional Government endowed itself with a groundwater and surface water management system based upon a very detailed mathematical simulation 3D model of TRHB.

un'estensione pari a 1246.21 Km<sup>2</sup> e da una quota media di 730 m s.l.m., ed entrano nel BICAT attraversando una Zona di Trasferimento, vale a dire una zona in cui non esiste la possibilità di invasare tali acque né in superficie, né in sottosuolo (Fig. 3). La porzione di BICAT satura di acque dolci, oggetto del presente studio, ha quindi uno spessore molto variabile, compreso tra i pochi metri, lungo il Margine Appenninico e nella Zona di Trasferimento, e gli oltre settecento metri al di sotto della confluenza tra i Fiumi Taro e Po. Il volume totale del bacino saturo in acque dolci supera i 200'000 Mm<sup>3</sup> e le riserve idriche sotterranee ammontano ad oltre 20'000 Mm<sup>3</sup>.

Nell'area di studio si concentrano molte attività agro-industriali di rilievo. Per sostenere le attività economiche e le richieste di acqua potabile della popolazione residente nella Provincia di Parma, ogni anno si sottraggono al BICAT circa 90 Mm<sup>3</sup> di acqua di falda. Inoltre, ogni estate, nella Zona di Trasferimento si derivano circa 50 Mm<sup>3</sup> di acqua dal Fiume Taro a scopo irriguo, causando un impatto ingente sull'ambiente. Da questi numeri appare chiaro che la sostenibilità dello sfruttamento delle risorse idriche dipende da una gestione equilibrata ed integrata delle falde e delle acque fluviali. Allo scopo, quindi, di valutare e pianificare la sostenibilità di tali prelievi, attraverso la piena comprensione della dinamica e della capacità di ricarica del bacino idrogeologico, la Regione Emilia-Romagna si è dotata di un sistema integrato di gestione delle acque superficiali e sotterranee basato su un modello matematico 3D molto dettagliato del BICAT.

## COSTRUZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE

Il modello di simulazione dei flussi idrici sotterranei nel BICAT si basa su un'architettura dettagliata delle Unità Stratigrafico - Deposizionali (ISSC, 1976) e delle corrispondenti Unità Idrostratigrafiche (MAXEY, 1964) illustrate in Figura 2. Tale architettura è stata definita mediante la realizzazione di un reticolo di sezioni idrostratigrafiche, complessivamente lungo 683 km, sviluppato attraverso lo studio strutturale e stratigrafico-sequenziale degli affioramenti sul Margine Appenninico e la correlazione di 2153 stratigrafie di pozzi e sondaggi raccolte in un'apposita Banca Dati (Fig. 4).

Sono state distinte 3 Unità Idrostratigrafiche di rango superiore, denominate Gruppi (di) Acquiferi, che affiorano sul margine meridionale del BICAT per poi immergersi verso nord al di sotto dei sedimenti depositati dal Fiume Po e dai suoi affluenti negli ultimi 18.000 anni, contenenti acquiferi di scarsa potenzialità (A0). I corpi geologici che fungono da acquiferi sono costituiti da sedimenti ghiaiosi e sabbiosi di origine deltizia ed alluvionale, depositi dai paleo-fiumi Taro e Po a partire da oltre 1 milione di anni fa. Ciascun Gruppo Acquifero risulta idraulicamente separato, almeno per buona parte della sua estensione, da quelli sovrastanti e sottostanti, grazie a barriere di permeabilità sviluppate a scala regionale. Al suo interno ogni Gruppo Acquifero è composto da serbatoi acquiferi sovrapposti e giustapposti, parzialmente o

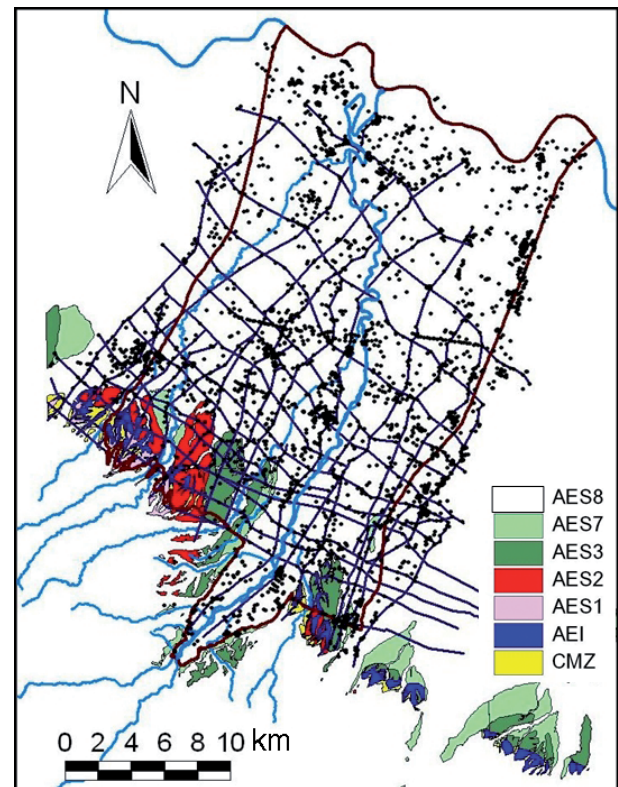


Fig. 4 - Carta delle Unità Stratigrafico - Deposizionali, terrazzate e affioranti, in cui si riportano la distribuzione dei 2153 pozzi e sondaggi raccolti nella Banca Dati e il reticolo delle sezioni idrostratigrafiche utilizzate per costruire il modello idrogeologico 3D del Bacino. La legenda delle Unità è la stessa di Fig. 2

- *Map of outcropping and terraced Stratigraphic-Depositional Units with the Data Base of the 2153 wells and boreholes distribution and the network of hydrostratigraphic sections designed to build the 3D hydrogeologic model of the Basin. Units legend as in Fig. 2*

## BUILDING THE CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL

The Basin groundwater flow simulation model is based on a detailed framework of the Stratigraphic-Depositional Units (ISSC, 1976) and the corresponding Hydrostratigraphic Units (MAXEY, 1964) showed in Fig. 2. To define this framework a network of hydrostratigraphic sections has been developed for an overall length of 683 km, resulting from the structural and sequence-stratigraphic study of the Apennine Margin outcrops and the correlation of 2153 well logs collected in a Data Base (Fig. 4).

Three main Hydrostratigraphic Units, called Aquifer Groups, have been mapped: they outcrop on the southern border of TRHB and then dip northwards under the mainly fine grained alluvial deposits recording the last 18.000 years of the Po River Plain evolution (A0). Fluvial and deltaic, sandy gravel bodies form the groundwater reservoirs deposited by Taro and Po paleo-rivers since over 1 Million years. Thanks to regionwide extended bottom permeability

totalmente isolati tra loro, suddivisi in Complessi e Sistemi (di) Acquiferi. Le principali barriere di permeabilità sono costituite da corpi geologici decametrici, a prevalente granulometria fine, interpretabili come sistemi deposizionali di prodelta, interconoide e bacino interfluviale, che si sovrappongono e giustappongono ai sistemi deposizionali fluvio-deltizi e di conoide alluvionale, ricchi in materiali grossolani.

Lo scheletro del modello idrogeologico 3D del BICAT è illustrato nella Fig. 5. Tuttavia, per ragioni di chiarezza, nella figura non sono rappresentate tutte le 19 superfici che delimitano i 18 livelli, definiti in Fig. 2, in cui è stato possibile suddividere il BICAT.

Per ciascuno dei livelli individuati è stata elaborata una mappa della distribuzione di ghiaie+sabbie in percentuale sullo spessore totale dell'Unità. Questo tipo di mappa è la base su cui definire, sia in prima approssimazione sia in fase di calibrazione del modello numerico, la distribuzione areale dei parametri idrogeologici (Kh e Kv: Conducibilità Idraulica orizzontale e verticale; n: Porosità efficace; Ss: Coefficiente di Immagazzinamento Specifico) all'interno di ogni Unità Idrostratigrafica (Fig. 6). In particolare, i parametri idrogeologici impostati in fase di allestimento del modello derivano da prove di pompaggio e di permeabilità in sito reperite in letteratura, dall'elaborazione, eseguita con il metodo di CASSAN (1980), di decine di prove di pozzo a gradini e da prove di pompaggio di lunga durata e prove con traccianti effettuate appositamente per questo progetto su 9 campi pozzo industriali e acquedottistici. La variabilità dei parametri idrogeologici all'interno dei 18 livelli definiti è riassunta nella Tab. 1 (parametri calibrati):

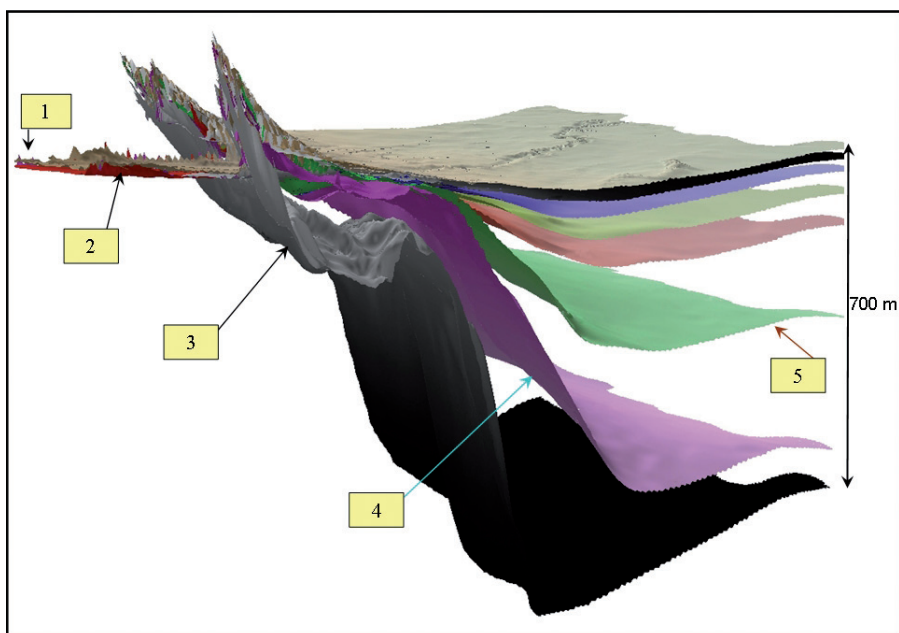
Si noti la Conducibilità Idraulica verticale minima, pari a  $1 \cdot 10^{-15}$  m/s, attribuita alle barriere di permeabilità. Essa esprime la deviazione dalla linearità che subisce la Legge di Darcy nei terreni argillosi, nel caso in cui il gradiente idraulico sia inferiore a un valore soglia

barriers, each Aquifer Group is hydraulically separated, for most of its extension, by the overlying and underlying units. Inside every Aquifer Group there are distinct reservoirs and local permeability barriers; they can therefore be subdivided into Aquifer Complexes and these last, in their turn, can be subdivided into partially or totally confined Aquifer Systems. Each reservoirs system is laterally and vertically confined by very thick and fine grained geological bodies (permeability barriers), interpretable as prodelta or interfluvial plain and flood basin depositional systems. Figure 5 shows the 3D simplified skeleton of TRHB. For the sake of evidence not all the 19 surfaces bounding the 18 hydrostratigraphic layers comprised into the TRHB have been represented.

For each of the 18 hydrostratigraphic layers, a gravels+sands isopercent map has been elaborated from the Data Base analysis. This kind of maps represents the base for setting the spatial distribution of the hydrogeologic parameters (Kh e Kv: Along Layer and Across Layer Hydraulic Conductivity; n: effective Porosity; Ss: Storage Compressibility) inside each Hydrostratigraphic Unit, either on first approximation that during the model calibration (Fig. 6). In particular, first approximation hydrogeologic parameters come from previously published pumping tests and in situ permeability tests, from tens of step-drawdown tests on wells, elaborated with the CASSAN method (1980) and from multiple borehole tests and tracer tests specifically developed for this project on 9 industrial and drinking water well fields. The variability of hydrogeologic parameters inside each of the 18 hydrostratigraphic layers is summarized in Tab. 1 (calibrated parameters):

A vertical Hydraulic Conductivity of  $1 \cdot 10^{-15}$  m/s is assigned to permeability barriers. This very low conductivity follow the experimental evidences that in compact clays Darcy's Law depart from

Fig. 5 - Architettura idrostratigrafica 3D, semplificata, del BICAT. LEGENDA: 1) Apice di Conoide; 2) Zona di Trasferimento; 3) Base del Gruppo Acquifero C; 4) Base del Gruppo Acquifero B; 5) Base del Gruppo Acquifero A - 3D simplified hydrostratigraphic framework of TRHB. LEGEND: 1) Fan Apex; 2) Transfer Zone; 3) Bottom of Aquifer Group C; 4) Bottom of Aquifer Group B; 5) Bottom of Aquifer Group A



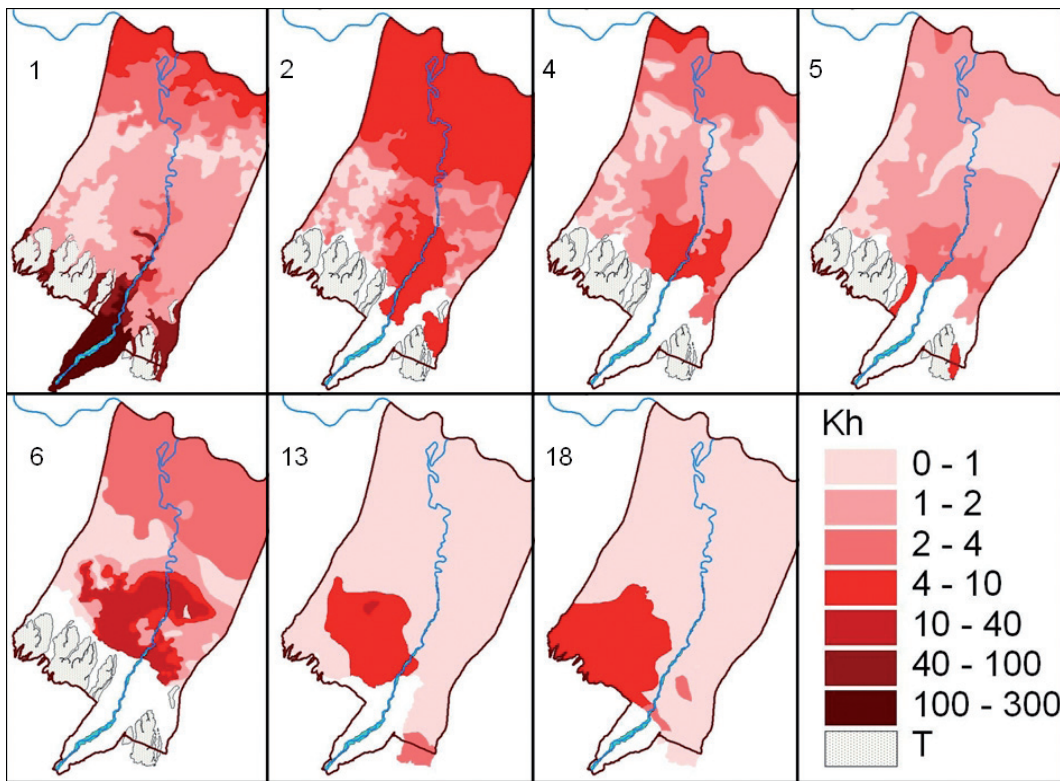


Fig. 6 - Distribuzione della Conduttività Idraulica orizzontale in alcune Unità Idrostratigrafiche del modello. I numeri si riferiscono al livello idrostratigrafico di Fig. 2. LEGENDA: Kh: Conduttività Idraulica orizzontale ( $1 \cdot 10^{-4}$  m/s); T: Unità Idrostratigrafiche terrazzate.

che sembra compreso tra 20 e 30 (DE MARSILY, 1986; CESTELLI GUIDI, 1987). Qualunque sia il valore soglia, resta il fatto che il valore di Conduttività Idraulica verticale ricavato comunemente dalle prove edometriche (tra  $1 \cdot 10^{-11}$  e  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s) si ottiene imponendo ai campioni di terreno gradienti idraulici migliaia di volte superiori a quelli riscontrabili in campagna e pertanto non si ritiene corretto utilizzarlo nella modellistica dei bacini idrogeologici.

Per rendere conto della compartimentazione idrogeologica del

linearity when hydraulic gradient fall under a threshold being probably worth between 20 and 30 (DE MARSILY, 1986; CESTELLI GUIDI, 1987). Whatever the threshold real value, the vertical Hydraulic Conductivity of compact clays coming from oedometric tests (between  $1 \cdot 10^{-11}$  and  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s) results too high and unsuitable for hydrogeologic basin modelling as it is obtained applying to the sample hydraulic gradients thousands of times higher than those measurable in the field.

Tab. 1 - Variabilità dei parametri idrogeologici, calibrati, all'interno dei 18 livelli del modello  
- Variability of hydrogeologic calibrated parameters inside each of the 18 hydrostratigraphic layers of the model

	$K_h$ max (m/s)	$K_h$ min (m/s)	$K_v$ max (m/s)	$K_v$ min (m/s)	n max	n min	Ss max	Ss min
1	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	<b>0.05</b>	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
2	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
3	$8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
4	$5 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
5	$5 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
6	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$
7	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$
8	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.18	0.05	$1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$
9	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$
10	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$
11	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.18	0.06	$9 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
12	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
13	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.22	0.05	$6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
14	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.15	0.15	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
15	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.18	0.05	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
16	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.18	0.05	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
17	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-15}$	0.20	0.08	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
18	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-15}$	<b>0.24</b>	0.10	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$

BICAT, sono state studiate attentamente sia la piezometria nelle diverse Unità Idrostratigrafiche sia le caratteristiche idrochimiche delle acque sotterranee. Al tal fine è stata allestita una rete di monitoraggio costituita da 192 punti di misura (Fig. 7): le misure piezometriche e le analisi idrochimiche eseguite alla fine del mese di maggio 2005 sono state elaborate congiuntamente alle altezze idrometriche dei fiumi Po, Taro e Baganza registrate nello stesso periodo, in modo da ricostruire le superfici piezometriche relative ai Complessi Acquiferi A0, A1, A2, A3+A4, B e C (Fig. 8).

La costruzione del modello idrogeologico concettuale è stata completata con le condizioni al contorno date da:

1. **I prelievi da pozzo.** Alla fine di maggio del 2006 nell'area di studio era nota l'attività di 2134 pozzi non domestici. Dei 116 pozzi più importanti, vale a dire i 30 pozzi dell'acquedotto pubblico, i 9 pozzi irrigui consortili e i 77 pozzi industriali con un prelievo annuo maggiore di 100.000 m<sup>3</sup>, sono state registrate le portate medie mensili. Tali curve di portata sono state applicate al modello nei punti e nei livelli idrostratigrafici corrispondenti alla posizione reale dei pozzi e dei filtri. I 59 pozzi industriali con un prelievo annuo minore di 100.000 e maggiore di 3650 m<sup>3</sup> sono stati inseriti nel modello singolarmente, considerandoli a portata costante. Tutti gli altri pozzi sono stati suddivisi in classi di aggregazione in funzione dei Gruppi Acquiferi captati e dell'areale

To account for the hydrogeologic partitioning of TRHB, the piezometric levels inside each Hydrostratigraphic Unit and the hydrochemical characterization of groundwaters have been carefully studied. Just for these purposes a specific groundwater monitoring network comprising 192 piezometers has been set up (Fig. 7): piezometric levels, hydrochemical analysis and hydrographs of Po, Taro and Baganza Rives recorded at the end of May 2005 have been elaborated to produce the piezometric contours of Aquifer Complexes and Groups A0, A1, A2, A3+A4, B and C (Fig. 8).

The following boundary conditions complete the building of the conceptual hydrogeological model:

1. **Pumping water wells.** At the end of May of 2005 in the study area there were 2,134 water wells granted for economic purposes. The monthly mean discharges of the most important wells, that is to say the 30 wells of the public aqueduct, the 9 irrigation wells of the agricultural unions and the 77 industrial wells pumping more than 100,000 cubic meters per year, have been recorded. These discharge logs have been put into the model one by one, respecting the actual topographic and hydrostratigraphic position of the wells and their screens. Even the 59 industrial wells pumping more than 3,650 but less than 100,000 cubic meters per year have been put into the model one by one, but considering constant pumping rates. All the other wells (1,320

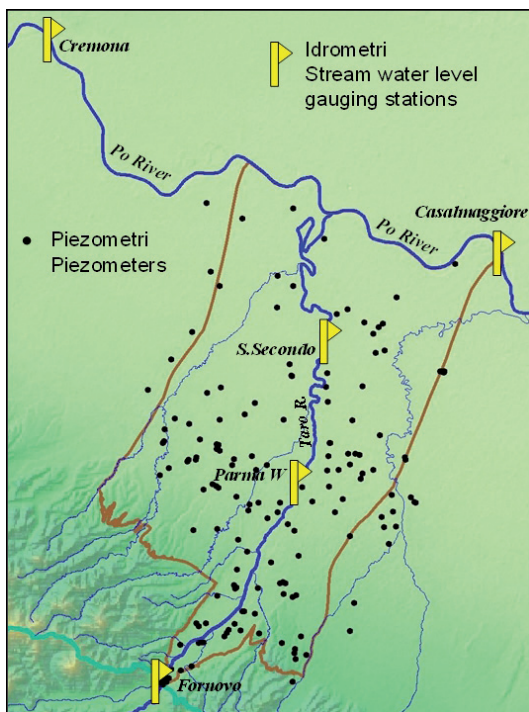


Fig. 7 - Reti di monitoraggio idrometrico e piezometrico  
- Groundwater and stream water monitoring network

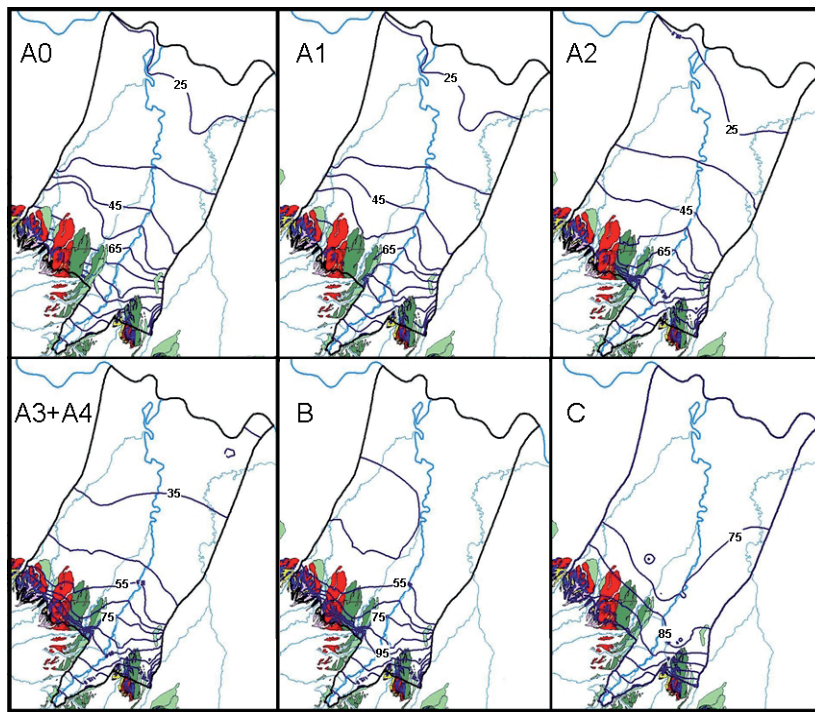


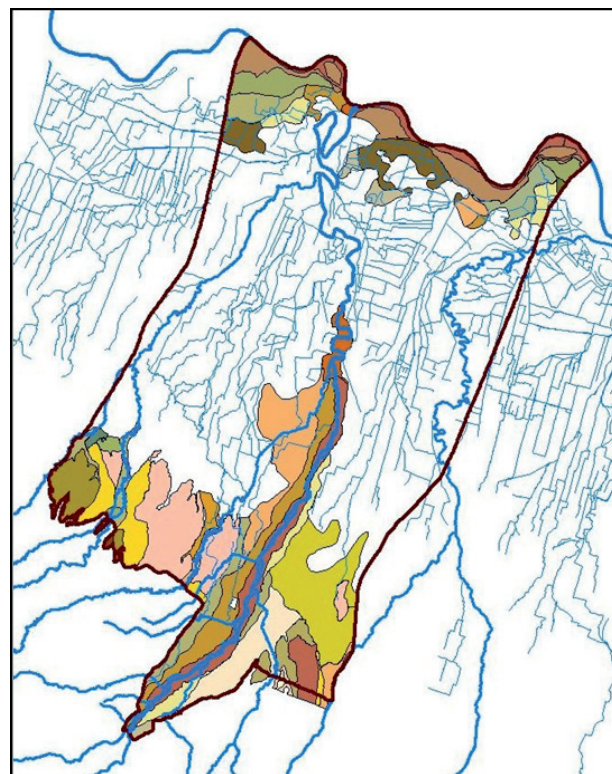
Fig. 8 - Piezometrie dei Complessi Acquiferi A0, A1, A2, A3+A4, B e C costruite con le misure effettuate il 20 Maggio 2005 (condizioni iniziali del modello). Equidistanza isopieze: 10 m  
- Piezometric contours of Aquifer Complexes and Groups A0, A1, A2, A3+A4, B and C elaborated from measurements recorded on 20 May 2005 (initial conditions of the model). Contour lines every ten meters

irriguo in cui ricadono. Quindi sono stati definiti dei volumi idrostratigrafici ai quali è stata applicata la curva di pompaggio che risulta dalla somma delle portate dei singoli pozzi che ciascun volume racchiude. L'aggregazione spaziale è stata eseguita su 1320 pozzi irrigui, 476 pozzi zootecnici e 163 pozzi assimilabili a domestici e industriali con portata minore di 10 m<sup>3</sup>/g. Si è assunto che i pozzi zootecnici ed assimilati ai domestici funzionassero a pompaggio costante, mentre per i pozzi irrigui sono state costruite delle curve di portata variabili nel tempo in relazione all'andamento di pioggia e temperatura registrati nelle stazioni idro-meteorologiche regionali. Nella calibrazione del modello matematico, tuttavia, vista l'impossibilità di effettuare misure dirette, i prelievi da pozzo per uso irriguo sono stati trattati come una variabile da calibrare, vincolata a non superare un valore massimo mensile.

- Gli apporti meteorici netti.** La ricarica zenitale giornaliera è stata calcolata dal Servizio Geologico e Pedologico della Regione Emilia-Romagna con il modello matematico MACRO (LARSSON & JARVIS, 1999). MACRO calcola il flusso idrico nei suoli coltivati sulla base dei dati pedologici, colturali e meteorologici. Benché disponibile su tutta l'area di studio, la ricarica zenitale giornaliera non è stata implementata su gran parte della media e bassa pianura (Fig. 9). In tali zone, infatti, esistono, nei primi metri di terreno al di sotto del suolo, falde minori e falde sospese connesse alla rete dei canali irrigui e separate idraulicamente dagli acquiferi principali. Questo sistema idrologico pellicolare non è né descritto né preso in considerazione dal modello matematico in questione.
- I carichi idraulici imposti all'apice della conoide, lungo il suo bordo meridionale e localmente sui margini del modello.** Le condizioni al contorno di carico imposto sono state utilizzate su porzioni del margine meridionale e sud-occidentale del Gruppo C e in varie porzioni di margine del Gruppo A per condizionare il modello nel modo idrogeologicamente più aderente alla realtà. In particolare le condizioni di carico imposto per il Gruppo C (Fig.10: quadri n.15 e 19) simulano le condizioni di alimentazione lungo il margine collinare meridionale e sud-occidentale: esse in parte discendono dai rilievi piezometrici effettuati su piezometri selettivi posti lungo il margine, mentre in parte derivano da condizioni topografiche. Il Gruppo C è considerato chiuso sul limite di valle. Le condizioni di carico imposto per il Gruppo A (Fig. 10: quadri n.1, 2, 3 e 8) simulano a monte, nella zona di Fornovo, la ricarica subalvea del Fiume Taro, mentre a valle e lungo alcune parti dei limiti orientale e occidentale esse impongono i flussi entranti o le perdite verso il Gruppo Acquifero A padano o verso le Conoidi dei Torrenti Parma e Baganza sviluppate nel Complesso A1. Le condizioni di carico imposto per il Gruppo A discendono da rilievi e registrazioni piezometriche effettuate su piezometri selettivi posti appositamente lungo il contorno dell'area di studio.
- I deflussi idrici basali provenienti dagli affluenti del fiume Taro che entrano dal margine meridionale del bacino.** Le irrigazione wells, 476 breeding wells and 163 wells pumping less than 10 cubic meters per day) have been classified and grouped on the basis of the hydrostratigraphic position of the screens and the irrigation district in which they are placed. Each group defines a hydrostratigraphic volume to which has been applied the pumping discharge curve resulting from the sum of the discharges of the wells included inside. A constant pumping rate has been assumed for the breeding wells; for the irrigation wells, on the contrary, variable rate pumping curves have been made up following the records of precipitation and temperature in the Regional gauges network. Nevertheless, as it is impossible to measure all the well abstractions for irrigation purposes, in the mathematic modelling they have been treated as a variable to calibrate, constrained by a monthly maximum limit.
- Infiltration and recharge from precipitation.** The Geologic and Pedologic Survey of Regione Emilia-Romagna calculated the daily zenithal recharge using the mathematical model MACRO (LARSSON & JARVIS, 1999). MACRO calculates coupled unsaturated-saturated water flow in cropped soil basing on pedologic, climatic and cultivation data. Although available on the whole study area, daily recharge from precipitation hasn't been taken into consideration on the main part of middle and lower alluvial plain (Fig. 9). In fact, in the first meters underneath the ground of those areas, there is a local groundwater flow system strictly connected to the irrigation channels network and hydraulically separated from the main aquifer systems. This local hydrologic system has been intentionally removed from the hydrogeologic model of the Basin.
- Prescribed piezometric heads at the Fan Apex, along the southern boundary and locally on the other boundaries of the model.** Time-variable piezometric head conditions have been prescribed on some parts of Aquifer Groups C and A boundaries to adapt the model to the real hydrogeological conditions of the Basin. In particular, the prescribed piezometric heads on Group C limits (Fig.10: images 15 and 19) simulate the feeding conditions along the southern and south-western margin of the model: they partly come from measurements recorded in selected piezometers located along the Margin and partly come from topographic conditions. The other limits of Group C have been assumed to be closed. The prescribed piezometric heads on Group A limits (Fig.10: images 1, 2, 3 and 8) allow to simulate the recharging water flow coming from upstream under the Taro River bed at its Fan Apex and the groundwater exchange flows with the downstream neighbouring aquifer systems. These boundary conditions come from measurements recorded on purpose in selected piezometers located along the border of the study area.
- Base flows of Taro River tributaries entering the southern margin of the Basin.** Time-variable flow conditions have been



Fig. 9 - Condizioni al contorno di ricarica zenitale. Ogni area colorata è caratterizzata da una propria curva di ricarica zenitale, calcolata sulla base dei dati pedologici, colturali e meteo-climatici  
- Areas of infiltration and recharge from precipitation. Each coloured area is characterized by a specific infiltration log computed on the base of pedologic, climatic and cultivation data



condizioni al contorno di flusso imposto sono state utilizzate su porzioni del margine meridionale del Complesso Acquifero A0 (Fig. 10, quadri n. 1 e 2) per simulare il deflusso basale entrante attraverso il subalveo dei rii minori affluenti del Taro. Per ottenere delle curve di deflusso basale giornaliero attendibili è stato allestito e calibrato appositamente un modello afflussi-deflussi a parametri concentrati, basato sul codice di calcolo Mike11 - NAM creato dal Danish Hydraulic Institute: esso simula in continuo i deflussi fluviali e basali dei bacini minori in risposta agli eventi meteorici registrati presso le stazioni pluviometriche distribuite nell'area di studio. Il contorno del Gruppo Acquifero B è considerato ovunque a flusso imposto nullo. Il Gruppo B si alimenta dai Gruppi C ed A attraverso porzioni limitate delle superfici di base e di tetto.

5. **Le condizioni al contorno di scambio idrico fiume-acquiferi.** Le condizioni al contorno da imporre in corrispondenza dei corsi d'acqua principali (Fiume Po, Fiume Taro e Torrente Baganza: Fig. 10, quadri n. 1 e 2) hanno richiesto un corposo approfondimento di studio al fine di valutare opportunamente la dinamica dei rapporti fiume-acquiferi. Si è deciso di eseguire una modellazione idraulica monodimensionale di tali corsi d'acqua che implementasse le morfologie degli alvei ottenute da un rilievo topografico di elevato dettaglio e di recente acquisizione (2004 - 2005) e le portate in essi fluenti a scala giornaliera, a meno dei prelievi effettuati dai consorzi irrigui. Il modello matematico del deflusso idrico nella rete fluviale è stato implementato con il codice di calcolo MIKE11, un sistema di simulazione ad elementi finiti 1D, sviluppato dal Danish Hydraulic Institute e diffuso a scala mondiale.

put on the southern margin of Aquifer Complex A0 (Fig.10: images 1 and 2) to prescribe the base flow entering the TRHB trough the Taro River tributaries. The base flow daily curves prescribed on that boundary are the output of a watershed lumped-parameter numerical model, setup and calibrated on purpose. Based on the NAM - MIKE11 hydrologic model created by the Danish Hydraulic Institute, it simulates the continuous runoff and base flow of the Taro River tributaries catchments in response to the rainfall and temperature data recorded by the hydrologic monitoring network already operating in the study area and acquiring data by remote control every half an hour. No flow boundaries are prescribed on the Aquifer Group B. This Group is fed by Groups C and A through small parts of its bounding top and bottom surfaces.

5. **Head dependent boundary conditions (stream - aquifer connections).** The specification of daily head dependent boundary conditions to properly assess the leakage to or from the Po, Taro and Baganza Rivers (Fig.10: images 1 and 2), required an extra modelling work. A one-dimensional hydraulic model of the river network, based on a recent (2004 - 2005) and detailed thalweg topographic survey and on the half-hourly rivers discharge reduced by agricultural unions withdrawals, has been setup. The river network model has been implemented into the MIKE11 software package, a worldwide 1D finite element river simulation system developed by the Danish Hydraulic Institute.

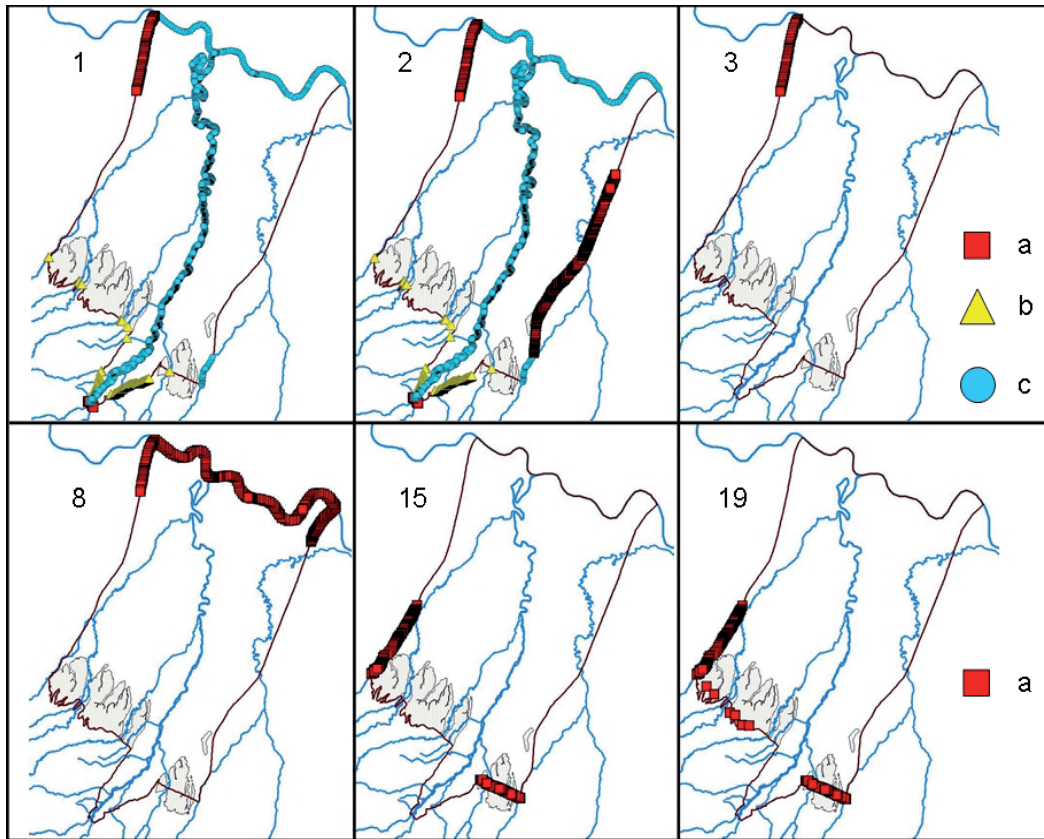


Fig. 10 - Condizioni al contorno: carico imposto (a); flusso imposto (b); scambio fiume-acquiferi (c). I numeri a lato delle immagini si riferiscono alle 19 superfici che delimitano i 18 livelli idrostratigrafici indicati in Fig. 2. Nessuna condizione al contorno sulle superfici 11, 12, 13 and 14  
 - *Boundary conditions: prescribed head (a); prescribed flow (b); head dependent (c). The numbers beside each image refer to the 19 surfaces bounding the 18 hydrostratigraphic layers showed in Fig. 2. No boundary conditions on surfaces 11, 12, 13 and 14*

### COSTRUZIONE E CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO 3D DEL BACINO

Il modello matematico 3D dei flussi idrici sotterranei nel BICAT è stato sviluppato con il codice di calcolo Feflow, un sistema di simulazione agli elementi finiti 3D dei flussi idrici e del trasporto di massa e/o del calore nel sottosuolo, sviluppato dalla WASY GmbH di Berlino, ora incorporata dal Danish Hydraulic Institute. Il modello ottenuto è formato da 421506 elementi finiti prismatici a 6 nodi, suddivisi in 18 strati. Esso è accoppiato, mediante condizioni al contorno di Cauchy, al modello ad elementi finiti 1D dei sistemi fluviali Taro, Po e Baganza citato in precedenza (Fig. 11).

Il modello matematico 3D dei flussi idrici sotterranei nel BICAT è stato calibrato direttamente in stato transitorio. Il periodo preso in considerazione per la simulazione inizia il 20/05/05 alle ore 11:00 e termina il 31/10/06 alle ore 23:30. Al tal fine, sulla rete di monitoraggio piezometrico di Fig. 7, tra i mesi di maggio 2005 e novembre 2006, sono state eseguite misure piezometriche contemporanee e con cadenza minima mensile. E' da notare che 46 piezometri della rete sono stati dotati di strumentazione per la misurazione del livello idrico in automatico, con cadenza oraria o semioraria. La rete di monitoraggio piezometrico completa la rete di monitoraggio delle precipitazioni e dei deflussi fluviali già attiva nell'area di studio, funzionante in telemisura e con cadenza semio-

### SETUP AND CALIBRATION OF THE 3D MATHEMATICAL MODEL

The groundwater flow 3D mathematic model of TRHB has been implemented in the Feflow software package, a 3D finite element subsurface flow and transport simulation system developed by WASY GmbH in Berlin, now part of the Danish Hydraulic Institute. The resulting model is formed by 421506 six-noded, triangular prism, finite elements, subdivided into 18 layers. It is coupled via Cauchy type boundary conditions to the previously cited 1D finite element model of the Taro, Po and Baganza rivers (Fig. 11).

The 3D finite element model of TRHB has been directly calibrated under transient-state conditions. The simulation period begins on May 20<sup>th</sup> 2005 at 11:00 AM. and ends on October 31<sup>st</sup> 2006 at 11:30 PM. Just for calibration purposes, the groundwater levels in the monitoring network showed in Fig. 7 have been measured at least at monthly interval. It's worth noting that 46 piezometers are instrumented with dataloggers, recording measurements with time steps of half an hour. This groundwater level monitoring network completes the rainfall and stream water level monitoring networks already operating in the study area and acquiring data by remote control every half an hour.

The calibration target was to find such a distribution of the hydrogeologic parameters and of the abstractions for irrigation purposes,

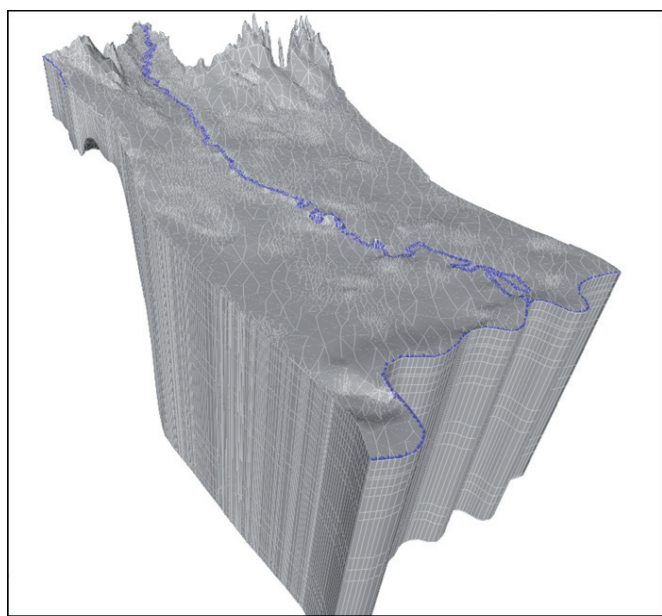


Fig. 11 - 1 modello matematico 1D del deflusso idrico nella rete fluviale accoppiato al modello matematico 3D dei flussi idrici sotterranei  
- The 1D river network model coupled with the 3D groundwater model

riaria dell'acquisizione dati.

Nella fase di calibrazione ci si è posti l'obiettivo di trovare una distribuzione dei parametri idrogeologici e delle pressioni antropiche non misurabili direttamente (curve di portata dei pozzi irrigui), tale da rendere inferiori a 3 m, in valore assoluto, sia gli scarti massimi, sia la dispersione degli scarti tra le curve piezometriche misurate e le curve piezometriche calcolate dal modello sulla rete di monitoraggio. Il valore di 3 m è stato considerato congruo sulla base della precisione con cui sono state stimate le quote delle teste pozzo della rete di monitoraggio e sulla base delle approssimazioni geometriche di costruzione del modello. In realtà però sono stati superati i 2 m di scarto solo sul 16.5% della rete di calibrazione, vale a dire 17 piezometri, la maggior parte dei quali è posta in aree di alta pianura ad elevata soggiacenza e notevole variazione piezometrica annua (4÷10 m) ovvero si trova in prossimità di campi pozzi industriali. I risultati della calibrazione sono illustrati in Fig. 12.

### VALUTAZIONE E VERIFICA DEL BILANCIO IDRICO

Nella tabella che segue si illustra dal punto di vista numerico il bilancio idrico elaborato dal modello nell'anno idrologico compreso tra il 01/10/2005 e il 30/09/2006.

Dato che il modello matematico del BICAT comprende anche la simulazione del flusso idrico superficiale, oltre ovviamente a quello sotterraneo, è possibile redigere il bilancio per il sistema fluviale del F. Taro, nel medesimo anno idrologico. La tabella che segue ne mostra i dettagli numerici.

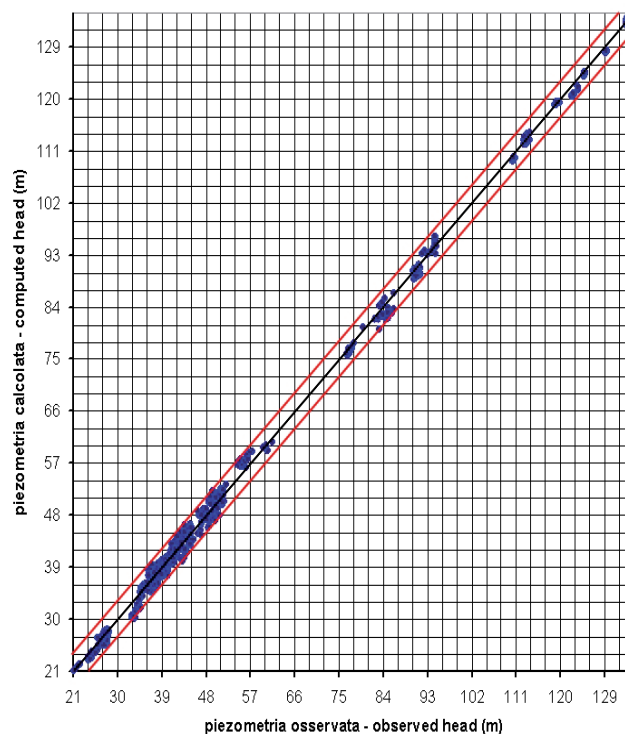


Fig. 12 - Diagramma generale di calibrazione del modello matematico del BICAT costruito utilizzando le misure di 100 piezometri della rete di monitoraggio. Le linee rosse racchiudono il campo di errore tollerabile  
- Plot of measured versus simulated heads in the 100 piezometers utilized to calibrate TRHB mathematic model. Red lines bound the calibration target

that both the absolute value and the scattering of the differences between measured and simulated heads in the monitoring network fell below 3 meters. This value may be considered consistent with the well heads elevation evaluation and the geometrical approximations allowed to build the hydrostratigraphic model. Nevertheless, only 16.5% of the calibration network (17 piezometers) actually showed differences above 2 meters and most of them are located near the Southern Basin margin, where the groundwater table is deep and subject to huge annual level variations (4÷10 m), or occur near the most important industrial well fields of the study area. The calibration results are showed in Fig. 12.

### WATER BALANCE EVALUATION AND VERIFICATION

The following table shows the numerical water budget computed by the model for the hydrologic year from October 1st 2005 to September 30th 2006 inclusive.

It is also possible to compute the water balance of the Taro River in the same hydrologic year, since this coupled model simulates the stream water flows in addition to the groundwater flows. The following table shows the numerical details.

The shown tables mean the TRHB groundwater resources in-

Le tabelle mostrano che l'anno idrologico 2005/2006 è stato per il BICAT un anno di lieve recupero delle riserve idriche sotterranee. Se il modello è affidabile, quindi, si può affermare che in un lungo periodo in cui le piogge registrate tra ottobre 2005 e aprile 2006 (periodo di ricarica degli acquiferi) e quelle registrate tra Maggio e Settembre 2006 (periodo irriguo) si avvicinano ai corrispondenti valori medi stagionali, allora il BICAT è in grado di sostenere l'attuale pressione antropica.

Tuttavia vale la pena di ricordare che i prelievi totali per uso irriguo che compaiono nella prima tabella, sono frutto dell'operazione di calibrazione del modello matematico. Essi infatti, nella fase di assegnazione delle condizioni al contorno, erano stati trattati come una variabile vincolata a non superare un valore massimo, stimato sulla base dei soli pozzi irrigui in Concessione entro il maggio del 2006. Nella stima non sono stati considerati né i ~ 1000 pozzi irrigui noti di cui non è mai stata richiesta la Concessione d'uso, né i 92 pozzi irrigui e i 76 pozzi industriali e zootecnici già esistenti, ma di cui è stata richiesta la Concessione d'uso dopo la metà del 2006, né tantomeno le migliaia di pozzi domestici che, specie in estate, pompano acqua per innaffiare orti e giardini. Per questo motivo è interessante verificare il modello, confrontando il valore calibrato per l'anno idrologico 2005/2006 con le stime del prelievo irriguo utilizzate per redigere il Piano Provinciale di Tutela delle Acque della Provincia di Parma approvato il 22 Dicembre 2008 (PPTA).

La stima del prelievo irriguo da pozzi del PPTA si fonda sulla stima delle superfici comunali potenzialmente irrigate, censite nel 2004, e sulle dotazioni idriche teoriche, stagionali, alla coltura. Il PPTA propone una stima per l'anno medio e una stima per l'anno mediamente secco ove per anno medio si intende quello nel quale le precipitazioni estive (da Maggio ad Agosto) nell'alta pianura ammontano a 224 mm, mentre nell'anno mediamente secco tali precipitazioni sono ridotte di circa un terzo (~150 mm). Relativamente all'area di studio il PPTA considera un prelievo irriguo di acque sotterranee compreso tra circa 36 e 44 milioni di metri cubi nell'anno mediamente secco e tra circa 17 e 23 milioni di metri cubi nell'anno medio. Poiché il 2006 è stato un anno irriguo mediamente secco per il BICAT (152 mm di pioggia da Maggio ad Agosto) si deve confrontare il prelievo irriguo da acque sotterranee ottenuto mediante calibrazione del modello matematico, pari a circa 43 milioni di metri cubi, con il valore medio dell'intervallo previsto dal PPTA (40 Mm<sup>3</sup>). In questo caso i 3 milioni in eccesso valutati dal modello si possono ripartire tra l'errore del modello stesso, la quota di prelievi dalle falde ignota all'Amministrazione Pubblica e quella consapevolmente trascurata (pozzi domestici) nella costruzione delle condizioni al contorno.

#### VALUTAZIONE DEGLI SCAMBI IDRICI FIUME-ACQUIFERI

L'accoppiamento del modello 3D di sottosuolo con quello 1D di superficie ha permesso di mappare in modo affidabile le zone di scambio fiume-falda e di valutare la ricarica degli acquiferi nelle più svariate condizioni di deflusso fluviale.

La Figura 13 illustra i diagrammi di portata dei Fiumi Taro e Po in corrispondenza delle sezioni d'ingresso nell'area di studio, nel pe-

riodato un po' in meno nel ciclo idrologico 2005/2006. Pertanto, se il modello è affidabile, questi risultati indicano che il TRHB può sostenere la reale domanda d'acqua per un lungo periodo in cui la precipitazione registrata dal 2005 (periodo di ricarica delle falde) e dal 2006 (periodo irriguo) si avvicina ai rispettivi valori medi stagionali. Tuttavia, è importante ricordare che il totale delle estrazioni per irrigazione in questa prima tabella deriva dalla calibrazione del modello. In pratica, durante la prima impostazione delle condizioni al contorno, l'importo delle estrazioni per irrigazione è stato considerato come una variabile vincolata da un limite massimo mensile, calcolato sulla base dei pozzi irrigui autorizzati al 31 maggio 2006. Questa stima non ha considerato le circa mille pozzi irrigui, ben noti ma ancora non autorizzati, e i 168 pozzi irrigui già esistenti, la cui autorizzazione è stata ottenuta dopo la prima metà del 2006 e inoltre le migliaia di pozzi domestici utilizzati in estate per innaffiare giardini. Per il motivo sopra indicato è interessante verificare il modello confrontando l'importo calcolato nel ciclo idrologico 2005/2006 con l'importo delle estrazioni per irrigazione utilizzate per il Piano di Tutela delle Acque (PTA) approvato dalla Provincia di Parma il 22 dicembre 2008.

L'importo stimato delle estrazioni per irrigazione in base al PTA è basato sul censimento delle superfici potenzialmente irrigate e sulla domanda teorica stagionale delle coltivazioni. Il PTA propone due calcoli: il primo per il valore medio delle precipitazioni annuali, il secondo per il valore medio delle precipitazioni annuali tipicamente secche. Nel primo caso la precipitazione estiva (dal maggio ad agosto) nella pianura sud-occidentale del Po ammonta a 224 mm e il PTA stima un importo di estrazioni per irrigazione vincolato tra 17 e 23 Mm<sup>3</sup>, mentre nel secondo caso la precipitazione estiva è ridotta a circa 150 mm e l'importo di estrazioni per irrigazione stimato è compreso tra 36 e 44 Mm<sup>3</sup>. La precipitazione estiva registrata nel TRHB nel 2006 ammonta a 152 mm; pertanto l'importo delle estrazioni per irrigazione calcolato dal modello, mostrato nella prima tabella, pari a circa 43 Mm<sup>3</sup>, deve essere confrontato con il valore medio dell'intervallo tra 36 e 44 Mm<sup>3</sup>, vale a dire circa 40 Mm<sup>3</sup>. In questo caso i 3 milioni di metri cubi in eccesso possono essere ripartiti tra l'errore del modello, la quota di estrazioni sconosciute all'Amministrazione Regionale e infine le estrazioni dei pozzi domestici, che sono state trascurate nella definizione delle condizioni al contorno.

#### ASSESSMENT OF STREAM-AQUIFER CONNECTIVITY

Il collegamento del modello 3D del sottosuolo con il modello 1D della superficie ha permesso di valutare in modo affidabile la connettività tra fiume e falda e di mappare le zone di scambio in diverse fasi del ciclo idrologico.

La Figura 13 mostra i log di portata del fiume Po e del fiume Taro nelle sezioni d'ingresso nell'area di studio, dal 20 maggio 2005 al 20 novembre 2005.

MODELLING GROUNDWATER-STREAM WATER INTERACTIONS IN THE TARO RIVER HYDROGEOLOGICAL BASIN  
(WESTERN EMILIA-ROMAGNA REGION, NORTHERN ITALY)

Volumi in ingresso nel sottosuolo dell'area di studio (Mm <sup>3</sup> )		
Ricarica zenitale	29.940	
Ricarica dal Fiume Taro	26.850	
Flusso subalveo entrante a Fornovo Taro	13.130	
Ricarica dal Torrente Baganza e dal suo subalveo	11.580	
Flusso subalveo entrante dai corsi d'acqua minori sul margine meridionale	13.910	
Flusso sotterraneo entrante dalle conoidi orientali (Parma-Baganza) nel Complesso A1	1.560	
Ricarica dal Margine meridionale negli acquiferi del Gruppo C	23.880	
<b>TOTALE (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>120.850</b>	
Volumi in Uscita dal sottosuolo dell'area di studio (Mm <sup>3</sup> )		
Perdite verso il Fiume Po	-13.230	
Perdite verso il Gruppo Acquifero A padano	-1.980	
Prelievi aggregati pozzi zootecnici, assim. ai domestici e industriali minori di 10 m <sup>3</sup> /gg	-4.960	
Prelievi Irrigui Pozzi Aggregati (DATO CALIBRATO)	-35.720	Prelievi irrigui totali -43.350
Prelievi Irrigui Pozzi Singoli	-7.630	
Prelievi pozzi acquedottistici	-17.000	
Prelievi pozzi industriali con portata maggiore di 10 m <sup>3</sup> /gg	-22.110	
<b>TOTALE (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>-102.630</b>	
<b>Volumi accumulati nel sottosuolo (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>18.220</b>	

Volumi in ingresso in superficie (Mm <sup>3</sup> )		
Flusso idrico superficiale entrante a Fornovo	814.080	
Volumi scambiati con il subalveo e con i Sistemi Acquiferi (Mm <sup>3</sup> )		
Drenaggio dal subalveo del Fiume Taro nella Zona di Trasferimento (A0)	5.400	
Ricarica degli acquiferi a valle della Zona di Trasferimento	-32.250	
Volumi in uscita in superficie (Mm <sup>3</sup> )		
Prelievo irriguo dal Fiume Taro	-51.454	
Flusso superficiale uscente in Po a meno del contributo degli affluenti tra Fornovo e la foce in Po	-735.776	

riodo compreso tra il 20 maggio 2005 ed il 1 novembre 2006. Le lettere apposte sui diagrammi indicano i punti, selezionati in base alla rappresentatività di determinate condizioni di deflusso fluviale, in corrispondenza dei quali sono state eseguite le valutazioni numeriche sul modello degli scambi idrici tra i fiumi e gli acquiferi.

Durante i picchi di piena (A in Fig. 13; Fig. 14a) il Fiume Taro alimenta i Gruppi Acquiferi A, B e C sottostanti la sua conoide alluvionale prossimale, nelle rispettive aree mappate in Fig.14, ad un tasso medio giornaliero compreso tra **0,32** e **0,35** m<sup>3</sup>/(s•km). Il valore più alto si registra durante i picchi di piena di fine estate; in corrispondenza di essi il Fiume Po alimenta soltanto il Complesso Acquifero A0 posto a sud del suo corso, lungo un fronte di circa 26 km, ad un tasso medio giornaliero compreso tra **0,16** e **0,26** m<sup>3</sup>/(s•km). In quest'ultimo caso, il tasso di infiltrazione risulta proporzionale all'altezza del picco.

Durante la fase calante delle piene (B in Fig. 13; Fig. 14b), il Comple-

Water volumes entering the hydrogeological basin (Mm <sup>3</sup> )		
Infiltration and recharge from precipitation	29,940	
Leakage from the Taro River	26,850	
Seepage flow under the Taro River bed at the Fan Apex	13,130	
Leakage from the Baganza River	11,580	
Base flows of Taro River tributaries	13,910	
Groundwater flows toward the Complex A1 coming from the neighbouring eastern aquifer systems (Parma River Alluvial Fan)	1,560	
Recharge of Aquifer Group C from the southern margin drainage stream network	23,880	
<b>TOTAL (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>120,850</b>	
Water volumes leaving the hydrogeological basin (Mm <sup>3</sup> )		
Leakage to the Po River	-13,230	
Groundwater flows towards the Aquifer Group A at the northern and north-eastern boundary	-1,980	
Pumping from well groups (breeding wells and wells pumping less than 10 cubic meters per day)	-4,960	
Pumping from irrigation well groups (CALIBRATED DATUM)	-35,720	Total pumping for irrigation - 43,350
Pumping from non grouped irrigation wells	-7,630	
Pumping from wells of the public aqueduct	-17,000	
Pumping from industrial wells (pumping more than 100,000 cubic meters per year)	-22,110	
<b>TOTAL (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>-102,630</b>	
<b>Water volume stored into the hydrogeological basin (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>18,220</b>	

Entering surface water volumes (Mm <sup>3</sup> )		
Stream flow entering the Fan Apex	814.080	
Water exchanged with the Aquifer Systems (Mm <sup>3</sup> )		
Leakage to the Taro River in the Transfer Zone (A0 Aquifer Complex)	5.400	
Recharge of the Aquifer Groups downstream of the Transfer Zone	-32.250	
Leaving surface water volumes (Mm <sup>3</sup> )		
Stream water derivated from the Taro River for irrigation purposes	-51.454	
Stream flow leaving the Taro River and entering the Po River (without the contribution of Taro River tributaries)	-735.776	

ber 1st 2006. Capital letters in the graph indicate the most representative points of the river flow stages: these have been selected to perform quantitative evaluations of daily mean stream-aquifer exchange rates with the help of the mathematic model.

During flood peaks (A in Fig. 13; Fig.14a) the Taro River feeds the Aquifer Groups C, B and A underneath his upper alluvial fan, as mapped in Fig. 14, at a daily mean rate ranging from **0.32** to **0.35** m<sup>3</sup>/(s•km), the highest value corresponding to late summer flood peaks. During late summer flood peaks the Po River feeds the southern connected Aquifer Complex A0 along a front of almost 26 km at a daily mean rate varying from **0.16** to **0.26** m<sup>3</sup>/(s•km). The rate amount directly depends on the peak water level.

During flow depletion stage of the flood (B in Fig. 13; Fig. 14b), in the upper alluvial fan of the Taro River only a minimum amount of the

so Acquifero A0 a sud del Po è drenato dal fiume e restituisce gran parte dell'acqua ricevuta durante il picco, ad un tasso medio giornaliero comparabile con quello d'infiltrazione; ciò non avviene nella conoide prossimale del Fiume Taro, dove la portata media giornaliera di drenaggio, per unità di lunghezza dell'asta fluviale, non supera mai  $0,005 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$ .

Il Fiume Taro alimenta i Gruppi Acquiferi A, B e C persino durante le magre estive ed autunnali (C in Fig. 13; Fig. 15a), ad un tasso medio giornaliero compreso tra  $0,02$  e  $0,08 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$ . I valori più elevati si registrano in giugno ed in luglio, in concomitanza con il massimo sfruttamento dei pozzi irrigui che forza l'infiltrazione dell'acqua fluviale nei Complessi Acquiferi. Durante le magre estive, invece, il Fiume Po continua a drenare il Complesso Acquifero A0 posto a sud dell'asta fluviale, ad un tasso medio giornaliero compreso tra  $0,01$  e  $0,03 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$ . Circa  $0,02 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$  continuano ad essere drenati anche durante le magre invernali (D in Fig. 13; Fig. 15b), mentre nella conoide prossimale del Fiume Taro, nello stesso periodo, prevale una situazione di equilibrio negli scambi fiume-falda. Il comportamento del modello nei periodi di magra estiva è stato verificato con misure di portata differenziali sia lungo il Po che lungo il Taro. In particolare un tasso medio pari a  $0,08 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$  è stato ottenuto durante una campagna di misure di portata eseguita nei mesi di giugno e luglio del 2002 proprio allo scopo di valutare le perdite estive dal Fiume Taro verso gli acquiferi della sua conoide alluvionale prossimale.

water that had previously entered the aquifer is returned to the stream at a daily mean rate which never exceeds  $0.005 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$ . On the contrary, most of the water that had previously entered the southern aquifers along the Po River is drained during the flow depletion stage of the flood at almost the same daily mean rate recorded during the flood peak.

Even during summer and early autumn low flows the Taro River feeds the Aquifer Groups C, B and A (C in Fig. 13; Fig. 15a) at a daily mean rate ranging from  $0.02$  to  $0.08 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$ . The highest values can be recorded in June and July, when the irrigation wells pump groundwater at their highest rate, so forcing the infiltration of the stream water. On the contrary, during summer and early autumn low flows the Po River drains the southern Aquifer Complex A0 at a daily mean rate ranging from  $0.01$  to  $0.03 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$ . Even during winter low flows (D in Fig. 13; Fig. 15b) the Po River drains the southern connected aquifers at a daily mean rate of about  $0.02 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$ , while equilibrium between feeding and draining prevails in the upper alluvial fan of the Taro River. The model response to summer low flows has been verified comparing the computed values with the results of some differential stream flow measurements carried out in the Po and Taro Rivers. In particular, during Summer 2002 some stream flow measurements were performed near the edges of the Taro River upper alluvial fan to evaluate the infiltration losses toward the aquifers. The mean value obtained is  $0.08 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km})$ , that matches very well the results of the numerical model of the Taro River Hydrogeological Basin.

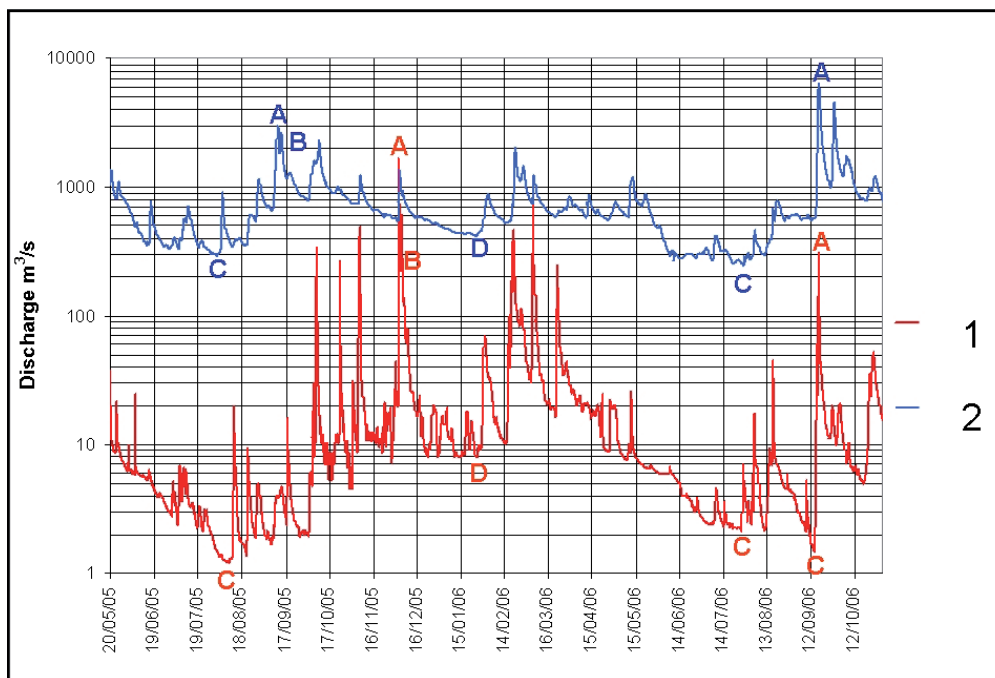


Fig. 13 - Diagrammi di portata dei Fiumi Taro e Po in corrispondenza delle sezioni d'ingresso nell'area di studio, nel periodo compreso tra il 20 maggio 2005 ed il 1 novembre 2006. LEGENDA: 1: Idrogramma del Fiume Taro a Fornovo; 2: Idrogramma del Fiume Po a Cremona; A: picco di piena. B: fase calante della piena. C: magre estive ed autunnali. D: magra invernale  
- Po River and Taro River discharge logs in the upstream sections of the study area, from 20 May 2005 to 1 November 2006. LEGEND: 1: Taro River water level at Fornovo; 2: Po River water level at Cremona; A: peak flood stage. B: flow depletion stage of the flood. C: summer and early autumn low flows. D: winter low flows

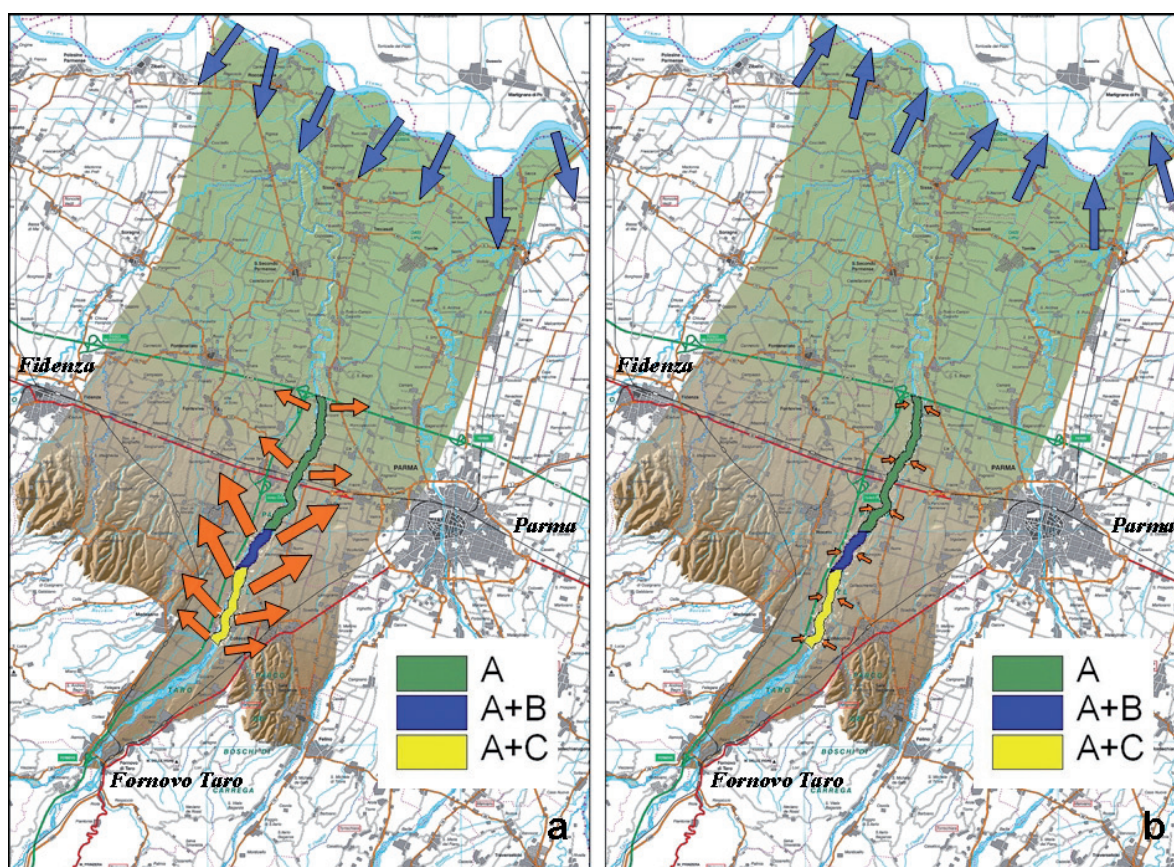


Fig. 14 - Mappe schematiche delle zone di scambio fiume-falda. La dimensione delle frecce fornisce una stima qualitativa del tasso di drenaggio o di ricarica degli acquiferi posti a sud del Fiume Po e nella Conoide Alluvionale del Fiume Taro, durante il picco di una piena (a) e durante la fase calante di una piena (b).  
 Legenda: A: zona di ricarica del Gruppo Acquifero A; A+B: zona di ricarica dei Gruppi Acquiferi A e B; A+C: zona di ricarica dei Gruppi Acquiferi A e C  
 - Map of stream-aquifer exchange areas and qualitative evaluation of the aquifer feeding/drainage rate along the Po and Taro Rivers during a peak flood stage (a) and during the flow depletion stage of a flood (b). Legend: A: Aquifer Group A feeding area; A+B: Aquifer Groups A and B feeding area; A+C: Aquifer Groups A and C feeding area

## CONCLUSIONI

La sostenibilità dello sfruttamento delle risorse idriche di un Bacino Idrogeologico dipende da una gestione equilibrata ed integrata delle falde e delle acque superficiali. La valutazione della ricarica degli acquiferi e, più in generale, degli scambi idrici fiume-falda rappresenta, quindi, un tema di fondamentale importanza sia nell'elaborazione dei bilanci idrologici sviluppati a scala di bacino sia nell'esecuzione di studi di ingegneria delle risorse idriche sviluppati a scala locale. Di questi ultimi, infatti, sono numerosi gli esempi relativi a campi di pozzi a uso industriale o idropotabile che sono stati progettati e perforati in vicinanza di corsi d'acqua al fine di indurre l'infiltrazione nell'acquifero delle acque fluviali (STUYFZAND *et alii*, 2004).

Una rassegna critica dei metodi di valutazione degli scambi idrici fiume-falda utilizzati dai ricercatori in tutto il mondo è fornita da BRODIE *et alii* (2007). Si annoverano sia metodi diretti che indiretti; è evidente, tuttavia, che negli studi a scala di bacino un approccio che tenda ad utilizzare solo misure dirette, vale a dire misure di portata fluviale

## CONCLUSIONS

The long-term exploitation sustainability of the water resources stored in a Hydrogeological Basin depends on a well-balanced and integrated management of its surface waters and groundwaters. The assessment of aquifers recharging capabilities and, in general terms, of stream-aquifer connectivity represents a very important matter, both in basin scale hydrologic balance evaluations that in local scale water resources engineering projects. As a matter of fact, at a local scale many industrial and drinking water wells have been projected and drilled near the riverbanks to force the stream waters to enter the aquifer systems (STUYFZAND *et alii*, 2004).

BRODIE *et alii* (2007) give a review of worldwide used methods to assess stream-aquifer connectivity. They enumerate both direct and indirect methods; it however stands to reason that studies at a basin scale can't be solely based upon field investigations such as fluvial discharge and direct infiltration measurements, because they should need huge amounts of time and money. In such cases, as in the study

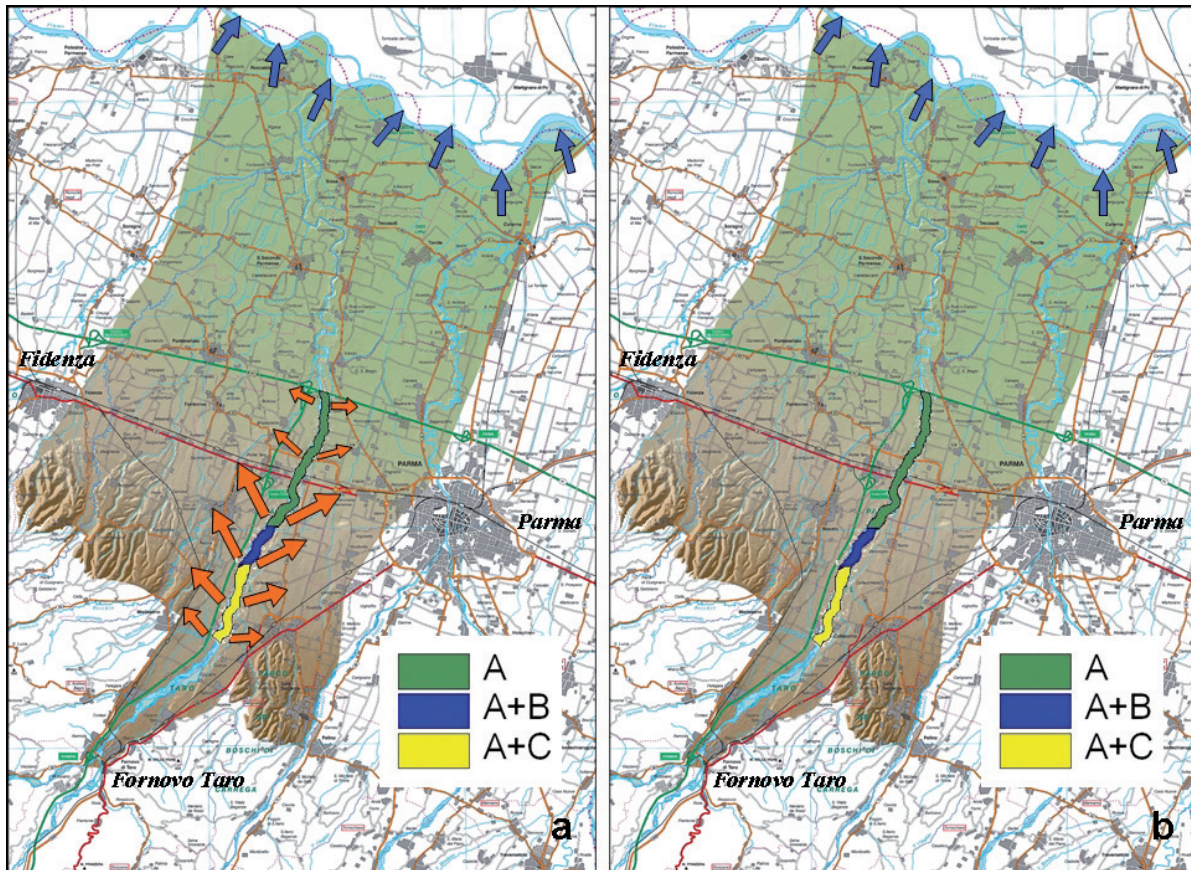


Fig. 15 - Mappe schematiche delle zone di scambio fiume-falda. La dimensione delle frecce fornisce una stima qualitativa del tasso di drenaggio o di ricarica degli acquiferi posti a sud del Fiume Po e nella Conoide Alluvionale del Fiume Taro, durante le magre estive ed autunnali (a) e durante la magra invernale (b).  
 Legenda: A: zona di ricarica del Gruppo Acquifero A; A+B: zona di ricarica dei Gruppi Acquiferi A e B; A+C: zona di ricarica dei Gruppi Acquiferi A e C  
 - Map of stream-aquifer exchange areas and qualitative evaluation of the aquifer feeding/drainage rate along the Po and Taro Rivers during summer and early autumn low flows (a) and during winter low flows (b). Legend: A: Aquifer Group A feeding area; A+B: Aquifer Groups A and B feeding area; A+C: Aquifer Groups A and C feeding area

e misure di infiltrazione, non è praticabile, in quanto esso richiederebbe tempi ed investimenti finanziari enormi. In questi casi, come nello studio del BICAT, è opportuno, allora, privilegiare i metodi di stima indiretti, ai quali appartiene l'utilizzo di modelli matematici, ricorrendo alle misure di campagna solo per la taratura o la verifica del modello.

Nel caso del Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del fiume Taro è stato sperimentato l'accoppiamento di un modello idrogeologico 3D con un modello idraulico fluviale 1D, entrambi di elevato dettaglio. Tale accoppiamento, se da un lato rende più laboriosi e difficoltosi l'allestimento e la taratura del modello, dall'altro consente di mappare in modo affidabile le zone di scambio fiume-falda e di valutare la ricarica degli acquiferi nelle più svariate condizioni di deflusso fluviale.

## RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia Giulia Barbacini, Mila Ferrari, Ilaria Fumi, Sergio Lasagna, Fabio Molinari, Stefano Segadelli e Federica Valenti, compagni e ricercatori insostituibili in questo lungo e faticoso studio. Un ringrazia-

of TRHB, it's better to privilege the indirect methods, the category which mathematic models belong to, resorting to field investigations for the calibration of the model only.

In the case study of Taro River Hydrogeological Basin the coupling of a 3D subsurface mathematic model with a 1D finite element river simulation model, both extremely detailed, have been experimented. Such a coupling, if on the one hand makes the setup and the calibration of the model harder and more difficult, on the other hand bears a reliable assessment of stream-aquifer connectivity and mapping of exchange areas under the most various stages of the river flow.

## AKNOWLEDGEMENTS

The author thanks Giulia Barbacini, Mila Ferrari, Ilaria Fumi, Sergio Lasagna, Fabio Molinari, Stefano Segadelli and Federica Valenti, non-replaceable researchers and travelling companions during this hard



mento sentito va alla dirigenza della Direzione Generale Ambiente della Regione Emilia-Romagna, in particolare al Dott. Raffaele Pignone del Servizio Geologico, per il sostegno profuso alla presente ricerca, nonché alla Prof.ssa Tullia Bonomi per aver finanziato questa pubblicazione. L'autore ringrazia, inoltre, Marina Guermandi, Letizia Fumagalli e Nicola Laruccia per l'elaborazione dei dati di percolazione del suolo utilizzati dal modello e Michela Diena per la revisione del testo.

and long study. He thanks the General Direction for the Environment of Emilia-Romagna Regional Government, and particularly Mr. Raffaele Pignone, Director of the Geological Survey, for supporting this research, as well as Mrs. Prof. Tullia Bonomi for financing this publication. The author finally thanks Marina Guermandi, Letizia Fumagalli and Nicola Laruccia for the elaboration of the soil infiltration data used by the mathematical model and Marisa Fornari for the careful text revision.

## OPERE CITATE/ REFERENCES

- ANDERSON M. P. & WOESSNER W. W. (1980) - *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic Press Inc., San Diego, CA U.S.A..
- BERNINI M. & PAPANI G. (1987) - *Alcune considerazioni sulla struttura del margine appenninico emiliano tra lo Stirone e l'Enza (e sue relazioni con il sistema del Taro)*. Ateneo Parmense, Acta Naturalia, **24**: 219-240, Parma, Italia.
- BRODIE R., SUNDARAM B., TOTTENHAM R., HOSTETLER S. & RANSLEY T. (2007) - *An overview of tools for assessing groundwater-surface water connectivity*. Bureau of Rural Sciences, Canberra, Australia.
- CASSAN M. & CAMBEFORT H. (1980) - *Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols*. Eyrolles, Paris, France.
- CESTELLI GUIDI C. (1987) - *Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni - Vol. I*. Hoepli, Milano, Italia.
- DE MARSILY G. (1986) - *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press, London, United Kingdom.
- DI DIO G. (1996) - *La nuova carta geologica della Provincia di Parma in scala 1:50.000: presupposto fondamentale per lo studio della geometria e della ricarica degli acquiferi*. In: ALIFRACO G. (1996, ed.) - *L'Acquifero Parmense - Relazione Annuale 1995*. Amministrazione Provinciale di Parma, Assessorato Ambiente e Difesa del Suolo, **2**: pp. 215-224, Parma, Italia.
- DI DIO G., LASAGNA S., PRETI D. & SAGNE M. (1997) - *Carta geologica dei depositi quaternari della provincia di Parma. Il Quaternario*, **10(2)**: 443-450, Roma, Italia.
- DI DIO G. (1998) - *Applicazione di concetti e metodi della stratigrafia fisica alla ricerca di risorse idriche nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola*. Giornale di Geologia, Serie 3a, **60**: 35-39, Bologna, Italia.
- DI DIO G., MARTINI A., LASAGNA S. & ZANZUCCHI G. (2005, Eds.) - *Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000*. Foglio 199 Parma Sud. Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, APAT - Servizio Geologico d'Italia. S.EL.CA., Firenze, Italia.
- DI DIO G. (2005) - *Lo studio dei depositi quaternari attraverso l'utilizzo di modelli stratigrafico-deposizionali*. In: DI DIO G., MARTINI A., LASAGNA S. & ZANZUCCHI G. (2005, Eds.) - *Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000*. Foglio 199 Parma Sud. Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, APAT - Servizio Geologico d'Italia, pp. 131-159, S.EL.CA., Firenze, Italia.
- ENI (1972) - *Acque dolci sotterranee*. Grafica Palombini, Roma, Italia.
- ISSC (1976) - *International Stratigraphic Guide*. Hedberg H. D. (ed.), Wiley & s., New York.
- LARSSON, M.H. & JARVIS, N.J. (1999) - *Evaluation of a dual-porosity model to predict field-scale solute transport in a macroporous clay soil*. Journal of Hydrology, **215**: 153-171, Elsevier B. V..
- MAXEY G.B. (1964) - *Hydrostratigraphic units*. Journal of Hydrology, **2**: 124-129, Elsevier B. V..
- PETRUCCI F., BIGI B., CAVAZZINI R., MORESTORI L., PANICIERI E., PECORARI M. & ROSSETTI G. (1975) - *Ricerche sulle acque sotterranee nella pianura parmense e piacentina. Sezioni interpretative degli acquiferi. (Parte I)*. Grafiche STEP, Parma, Italia.
- PROVINCIA DI PARMA - ASSESSORATO AMBIENTE, DIFESA DEL SUOLO E TUTELA DEL TERRITORIO (2008) - *Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale. A. Quadro conoscitivo. A.1 Approfondimento in materia di tutela delle acque*. Eliofofotecnica Barbieri, Parma, Italia.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA / IDROSER (1978) - *Progetto di Piano per la salvaguardia e l'utilizzo ottimale delle risorse idriche in Emilia-Romagna. Vol. VII. Il quadro idrogeologico regionale*. Idroser S.p.A. (ed.), Cooptip, Modena, Italia.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP (1998) - *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. G. DI DIO (ed.), S.EL.CA., Firenze, Italia.
- REGIONE LOMBARDIA, ENI DIVISIONE AGIP (2001) - *Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia*. C. CARCANO & A. PICCIN (eds.), S.EL.CA., Firenze, Italia.
- STUYFZAND P. J., JUHÁSZ-HOLTERMAN M. H. A. & DE LANGE W. J. (2004) - *Riverbank filtration in the Netherlands: well fields, clogging and geochemical reactions*. NATO Advanced Research Workshop: Clogging in Riverbank Filtration. 7-10 September 2004, Bratislava, Slovakia.
- VENZO S. (1973) - *Geomorfologia e idrogeologia della zona di Fornovo e della paleoconoide del fiume Taro (Parma). Cenno all'inquinamento atmosferico in connessione col regime dei venti*. Ateneo Parmense, Acta Naturalia, **9**: 183-211, Parma, Italia.

Received April 2010 - Accepted August 2010