

## DALL'ANALISI IDROSTRUTTURALE ALLO STUDIO MODELLISTICO DI ACQUIFERI REGIONALI

### FROM A HYDROSTRUCTURAL ANALYSIS TO THE MATHEMATICAL MODELLING OF REGIONAL AQUIFERS (CENTRAL ITALY)

ELISABETTA PREZIOSI(\*) & EMANUELE ROMANO(\*)

(\*) Istituto di Ricerca sulle Acque IRSA-CNR - Area della Ricerca di Roma 1 - Via Salaria, km 29.300 CP10 - 00016 Monterotondo (Roma) - Italy  
E-mail: preziosi@irsa.cnr.it - romano@irsa.cnr.it

#### RIASSUNTO

In questa comunicazione si descrivono alcune esperienze di modellazione alla scala regionale, relative all'acquifero carbonatico di Monte Coscerno e all'acquifero alluvionale di Petrignano d'Assisi. L'obiettivo è di evidenziare le principali differenze e analogie nell'applicazione della modellazione matematica agli acquiferi carbonatici in aree montuose e agli acquiferi di tipo alluvionale, principalmente a causa della diversa reperibilità dei dati. Nel primo caso è generalmente noto il bilancio idrogeologico, determinato mediante misure di campo, mentre è difficile l'osservazione diretta della superficie piezometrica a causa della sua notevole profondità; nel secondo caso la superficie piezometrica viene determinata a partire dalla misura dei livelli nei pozzi, ma non è generalmente noto il bilancio dell'acquifero se non attraverso stime indirette dell'infiltrazione efficace e degli eventuali altri apporti laterali, degli scambi con i corsi d'acqua, eccetera. La determinazione dei parametri idrodinamici, laddove possibile mediante prove di pozzo, ha comunque valore locale ed è influenzata dal fattore di scala.

Questo determina approcci diversi sia nell'elaborazione del modello concettuale che nella fase di calibrazione del modello numerico: per la simulazione di acquiferi carbonatici il target della calibrazione è il bilancio, vincolato dalla geometria del sistema nell'ambito di un ragionevole range di potenziali idraulici e di trasmissività. Il target della simulazione negli acquiferi alluvionali è invece il campo dei potenziali, vincolato dalla geometria del sistema nell'ambito di una stima ragionevole del bilancio e di un ordine di grandezza dei parametri idrodinamici.

Si vuole mostrare come, nonostante la diversità dell'approccio nella ricostruzione del modello concettuale, basato in un caso essenzialmente sulla conoscenza del bilancio, nell'altro del campo dei potenziali, la validità dei modelli numerici descritti sia a nostro avviso confrontabile.

**TERMINI CHIAVE:** modelli matematici, acquiferi montuosi, acquiferi alluvionali, analisi idrostrutturale, Italia centrale

#### PREMESSA

Nelle aree montuose così come per gli acquiferi alluvionali, la modellistica è uno strumento ormai largamente utilizzato nell'idro-

#### ABSTRACT

The present communication describes several regional-scale modelling experiences involving the carbonatic aquifer of Mt Coscerno and the alluvial aquifer of Petrignano d'Assisi. The aim is to highlight the principal differences and similarities in the application of mathematical models to carbonatic aquifers in mountain areas and to alluvial type aquifers resulting principally from the different availability of data. In the first case the hydrogeological balance, determined by field measurements, is usually known while direct observation of the piezometric surface is difficult owing to its extreme depth; in the second case, the piezometric surface is determined by measurement of piezometric level in wells although the aquifer balance is generally known only through indirect estimates of the effective infiltration and any other ancillary contributions (exchanges with watercourses, infiltration from boundaries, etc). The determination of the hydrodynamic parameters, wherever this is possible by means of pumping tests, in any case has only a local meaning and is influenced by the scale factor.

This results in different approaches both to the processing of the conceptual model and in the phase of calibrating the numerical model: in simulating carbonatic aquifers the calibration target consists of the balance, as constrained by the geometry of the system within a reasonable range of hydraulic heads and transmissivity values. In the case of alluvial aquifers the simulation target consists of the piezometric heads within a reasonable estimate of the balance and of the range of the hydrodynamic parameters.

The aim is to demonstrate that, despite the difference in approach to the reconstruction of the conceptual model, in one case based essentially on the knowledge of the balance, and in the other of the piezometric heads, the validity of the numerical models described is in our view comparable.

**KEY WORDS:** mathematical models, mountain aquifers, alluvial aquifers, hydrostructural analysis, Central Italy

#### FOREWORD

In both mountainous areas and in alluvial plain aquifers, mathematical modeling has now become a widely used tool in regional

geologia regionale, sia nella fase di studio dell'acquifero (migliore definizione del bilancio, stima indiretta dei parametri idrodinamici) che in quella operativa di gestione.

In questa nota si vuole ricordare come, attraverso anni di ricerche, BONI abbia contribuito alla applicazione della modellistica per lo studio e la gestione delle risorse idriche dei grandi acquiferi regionali ed in particolare delle idrostrutture carbonatiche dell'Appennino, mettendo in evidenza le peculiarità e le problematiche dell'applicazione di modelli numerici a questa tipologia di acquiferi. Si vuole inoltre mettere a confronto tali aspetti con le problematiche relative alla modellistica applicata ad acquiferi di tipo alluvionale. A questo scopo vengono descritti e confrontati due casi: il primo relativo all'acquifero carbonatico di Monte Coscerno in Umbria (BONI & PREZIOSI, 1993; PREZIOSI *et alii* 1995; PREZIOSI, 2007), il secondo, recentemente sviluppato dall'IRSA-CNR in collaborazione con ARPA Umbria, a Petignano di Assisi (ROMANO *et alii*, 2006; ROMANO & PREZIOSI, 2007). I due modelli realizzati vengono brevemente descritti, rimandando ai lavori citati per gli approfondimenti; in questa sede si evidenziano quegli aspetti caratteristici delle due diverse situazioni idrogeologiche per i quali le simulazioni numeriche presentano delle problematiche specifiche.

## INTRODUZIONE

L'obiettivo dei modelli matematici in idrogeologia è di elaborare previsioni sulla risposta di un acquifero a scenari di tipo gestionale e/o climatico; sono quindi strumenti fondamentali dell'idrogeologia quantitativa. I modelli numerici in particolare risolvono le equazioni che descrivono il flusso dell'acqua nel mezzo poroso mediante discretizzazione. Chi applica la modellistica sa anche quanto siano di aiuto nella valutazione della coerenza delle ipotesi relative al modello concettuale: se l'ipotesi è fisicamente da scartare il modello può fornire risposte non coerenti con la realtà idrogeologica.

Verso la fine degli anni '80 del secolo scorso, si dà avvio presso l'Università di Roma "La Sapienza" ai primi tentativi di modellare il flusso delle acque sotterranee dei grandi acquiferi carbonatici dell'Italia centrale, già oggetto di approfonditi studi di terreno che avevano portato ad una definizione di massima delle risorse disponibili e ad individuare i principali punti di recapito delle falde alle sorgenti "puntuali" e lungo i corsi d'acqua ("sorgenti lineari"). Fra i lavori più significativi si citano: BONI & PETITTA (1991), BONI & PREZIOSI (1993), BONI *et alii* (1994), PETITTA (1994), PREZIOSI (2007).

L'obiettivo era di testare sulle grandi risorse dell'Appennino un codice numerico alle differenze finite (NEWSAM, MARSILY *et alii*, 1978), ampiamente sperimentato su acquiferi di tipo alluvionale o sui grandi bacini sedimentari quale quello di Parigi. In quegli anni la modellistica era già estesamente applicata su questa tipologia di acquiferi, con lo scopo principale di prevedere l'evoluzione dei campi piezometrici in condizioni di sovrasfruttamento per emungimento da pozzi, mentre poco era stato fatto per simulare le condizioni di flus-

hydrogeology both during the phase of characterisation of the aquifer (best definition of balance, indirect estimate of the hydrodynamic parameters) and during that of managing the resources.

The present note aims to describe how, in the course of years of research, BONI contributed to the application of mathematical modeling to the study and management of the water resources pertaining to large regional aquifers and in particular to the carbonatic hydrostructures of the Apennines, highlighting the peculiarities and problems involved in the application of numerical models to this type of aquifer. One further aim is to compare these aspects with the problems associated with mathematical modeling applied to alluvial aquifers. To this end two cases are described and compared: the first refers to the carbonatic aquifer of Mt. Coscerno in Umbria (BONI & PREZIOSI, 1993; PREZIOSI *et alii*, 1995; PREZIOSI, 2007), and the second, recently developed by IRSA-CNR in collaboration with ARPA Umbria, to the Petignano di Assisi alluvial aquifer (ROMANO *et alii*, 2006; ROMANO & PREZIOSI, 2007). The two models developed are briefly described, leaving a more detailed description to the works cited; the characteristic aspects of the two different hydrogeological situations which give rise to specific problems for numerical simulations are highlighted herein.

## INTRODUCTION

The aim of mathematical modeling in hydrogeology is to produce predictions concerning the response of an aquifer to different management and/or climatic scenarios; the models thus represent fundamental tools in quantitative hydrogeology. In particular numerical models solve the equations describing water flow through a porous medium by means of discretization. Those accustomed to applying mathematical models are also aware how useful they are in evaluating the coherence of hypotheses related to the conceptual model: if the hypothesis is to be rejected on physical grounds the model may provide responses that are inconsistent with hydrogeological reality.

In the late 1980s, "La Sapienza" University of Rome made the first attempts to model the flow of the groundwater in the large carbonatic aquifers in Central Italy. The latter had already been subjected to in-depth field investigations which had produced a general determination of available resources and allowed the principal issues of the water tables to the springs and along watercourses ("linear springs") to be identified. The more significant works include BONI & PETITTA (1991), BONI & PREZIOSI (1993), BONI *et alii* (1994), PETITTA (1994), PREZIOSI (2007).

The aim was to try out on the large-scale Apennine groundwater resources a finite differences numerical code (NEWSAM, MARSILY *et alii*, 1978), which had been extensively tested on alluvial aquifers or on large sedimentary basins such as that of Paris. By that time mathematical modeling had already been applied extensively to this type of aquifer for the principal purpose of predicting the development of the piezometric fields in conditions of over-exploitation due to withdrawals from wells, whereas little had been done to simulate flow conditions in

so negli acquiferi delle aree montuose, le cui risorse erano utilizzate mediante prelievi alle sorgenti. Numerosi Autori hanno affrontato questo argomento, sia assimilando il sistema ad un mezzo continuo equivalente (ad esempio LEONARDI *et alii*, 1996; EISENHORE *et alii*, 1997), sia simulando la presenza di reticoli carsici con sistemi a doppia porosità, coniugando il flusso nella matrice con quello nelle fessure o nei condotti (ad esempio SAUTER, 1993; TEUTSCH, 1993) o tripla che distingue il flusso nei condotti, nelle fessure e nella matrice (CHENG & CHEN, 2005).

### IMPOSTAZIONE DEL PROBLEMA

L'implementazione dei modelli numerici nelle due tipologie di acquiferi presenta problematiche differenti. Nell'acquifero della pianura alluvionale (Fig. 1a) l'informazione disponibile, grazie alla presenza di pozzi, sondaggi e di altre indagini geognostiche, consente non solo di avere un modello concettuale dell'acquifero di tipo "distribuito", ma soprattutto permette di ricostruire il campo piezometrico: il problema da risolvere durante la calibrazione del modello consiste nella riproduzione del campo dei potenziali misurati con il vincolo della geometria dell'acquifero. Tuttavia è molto difficile la definizione sperimentale del bilancio a causa delle numerose componenti la cui misura di campo è difficoltosa, fra cui le complesse interazioni falda-fiume, l'infiltrazione zenitale, le eventuali entrate dai versanti (dirette o attraverso conoidi), le estrazioni da pozzi.

acquiferi in mountain areas, the resources of which were exploited by means of withdrawals from springs. Several Authors have been facing this topic, characterising the fractured system to an equivalent porous media (see for instance LEONARDI *et alii*, 1996; EISENHORE *et alii*, 1997), or else taking into account the existence of karstic conduits with a double porosity model, which considers simultaneously the flow in the matrix and the flow in the fissures/conduits (e.g. SAUTER, 1993; TEUTSCH, 1993) or triple porosity models which distinguish the flow in matrix, fissures and conduits (CHENG & CHEN, 2005).

### APPROACH TO THE PROBLEM

The implementation of numerical models of the two types of aquifer raises different problems. In the alluvial plain aquifer (Fig. 1a) the information available thanks to the existence of wells, drilling and other geognostic investigations, not only affords a "distributed type" conceptual model of the aquifer to be obtained but above all allows the piezometric field to be reconstructed: the problem to solve during the calibration of the model consists in the reproduction of the measured piezometric field, as constrained by the geometry of the aquifer. However, an experimental definition of the balance is very difficult owing to the numerous components that are often uncertain, including the complex water table/river interactions, effective rain infiltration, additional infiltration from external slopes (either direct or through alluvial fans), withdrawals from wells, etc.

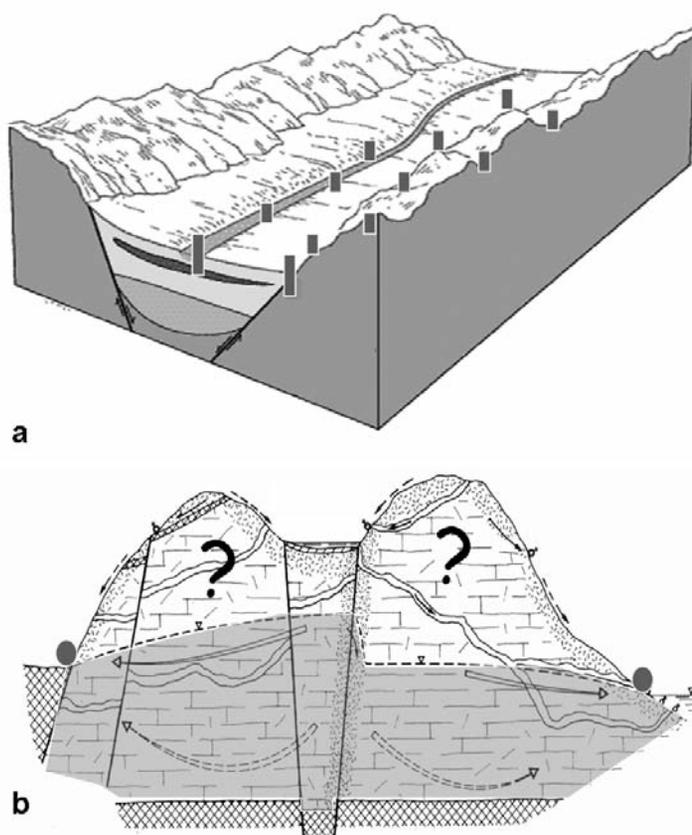


Fig. 1 - Confronto fra l'assetto di un acquifero di piana alluvionale (a) ed un acquifero montuoso carbonatico (b, modificato from CELICO, 1986). Nel primo caso, la presenza di pozzi permette di studiare l'assetto interno dell'acquifero; nel secondo caso l'informazione disponibile riguarda le condizioni al contorno

- Comparison between the configuration of an alluvial plain aquifer (a) and a carbonatic aquifer in a mountain area (b, modified from CELICO, 1986). In the first case, the presence of wells allows the configuration inside the aquifer to be investigated; in the second case, information is available on the boundary conditions

Viceversa negli acquiferi montuosi quali quelli appenninici (Fig. 1b) l'informazione disponibile consiste proprio nel bilancio idrogeologico, determinato mediante la misura della portata delle sorgenti e del flusso di base dei corsi d'acqua, a cui corrisponde la ricarica media alla falda. Questo approccio è reso possibile dalla geometria dei sistemi, che si configurano come delle strutture in rilievo confinate lateralmente da limiti a flusso nullo, generalmente in corrispondenza di fronti di sovrascorrimento. A causa della profondità della falda, generalmente elevata a causa della morfologia del territorio, sono assenti o molto rari i pozzi che perforino l'acquifero, quindi il campo dei potenziali è noto solo in corrispondenza delle sorgenti, puntuali o lineari che siano, ma sconosciuto all'interno dell'idrostruttura. Inoltre raramente si dispone di dati sulla trasmissività dell'acquifero, la cui stima mediante prove di portata, peraltro, è talmente legata a situazioni locali, specie negli acquiferi carbonatici, da essere difficilmente estrapolabile alla scala dell'acquifero. In questo caso la calibrazione del modello ha come target la distribuzione ed il regime di portata delle emergenze. Anche la geometria della struttura viene ricostruita mediante interpretazione di dati geologici di superficie, raramente vincolati da informazioni relative all'assetto interno. In sostanza manca generalmente la possibilità di vincolare il modello concettuale con dati interni alla struttura.

Nonostante la notevole differenza di assetto idrogeologico fra le due situazioni, dal punto di vista matematico l'approccio è identico: data una distribuzione di  $K$  (o di  $T$ ), la geometria dell'acquifero, i termini di sorgente (ricarica zenitale, estrazioni, interazione con i corpi idrici superficiali ecc.), le condizioni al contorno, si calcola il campo dei potenziali corrispondente.

L'equazione di flusso, rappresentata nella (1) nel caso particolare del mezzo isotropo ed omogeneo in regime permanente, ha tre incognite: il campo dei potenziali  $h$ , il bilancio (che comprende le condizioni al contorno e la distribuzione dei termini di sorgente  $Q$ ), il campo della trasmissività ( $T$ ).

$$\nabla^2 h = Q/T \quad (1)$$

Nel caso dell'acquifero alluvionale in genere si conosce bene  $h$ , nel caso dell'acquifero carbonatico si conosce bene il bilancio, in entrambi i casi è estremamente complessa la stima del campo del parametro idrodinamico (trasmissività o conducibilità idraulica), poiché il fattore di scala, la eterogeneità del mezzo, l'errore sperimentale rendono spesso poco significativi alla scala del modello i dati provenienti da misure puntuali eventualmente disponibili. Quindi il problema resta irrisolto: questo è evidente per l'acquifero carbonatico, in cui la mancata conoscenza del campo dei potenziali non permette di confrontare le piezometrie calcolate con una situazione di flusso nota, è meno evidente ma altrettanto vero per la simulazione di acquiferi di bacino alluvionale in cui si riproduce una piezometria nota ipotizzando un bilancio idrico ragionevole ma non misurato e spesso affetto da incertezze non trascurabili.

Conversely, in mountain aquifers (Fig. 1b), e.g. in the Apennines, the available information consists precisely in the hydrogeological balance, as determined by measuring the flow rate of springs and the base flow of watercourses to which the average recharge of the water table corresponds. This approach is made possible by the geometry of the systems which are configured as structures in relief laterally confined by no flow limits, frequently corresponding to compressive tectonic features (i.e. overthrusts). Because of the position of the water table, which is generally quite deep because of the morphology of the territory, wells perforating the aquifer are absent or very rare and so the piezometric heads are known only at the springs, whether they are point or linear springs, and unknown inside the hydrostructure. Furthermore, it is unusual for data on aquifer transmissivity to be available, the estimation of which by means of pumping tests is so closely linked to local situations, especially in carbonatic aquifers, that it is difficult to extrapolate to aquifer scale. In this case, the model calibration is aimed at reproducing the variation in space and time of the spring flow. Also the geometry of the structure is reconstructed through the interpretation of the surface geological data, which are rarely constrained by information relating to the internal configuration. In a word, there is generally no chance of constraining the conceptual model by means of data internal to the structure.

Despite the substantial difference in hydrogeological configuration between the two situations, from the mathematical standpoint the approach is the same: given a  $K$  (or  $T$ ) distribution, the geometry of the aquifer, the source terms (effective rainfall infiltration, withdrawals, interaction with surface water bodies, etc.), the boundary/initial conditions, the corresponding piezometric field is calculated.

The flow equation, represented in (1) in the special case of an isotropic and homogeneous medium in a steady state condition, has three unknowns: the piezometric field  $h$ , the balance (including the boundary conditions and the distribution of the source terms  $Q$ ), the transmissivity ( $T$ ).

$$\nabla^2 h = Q/T \quad (1)$$

Generally speaking, in the case of alluvial aquifers the piezometric field  $h$  is well known, while in the case of carbonatic aquifers the balance is well known; in both cases the estimation of the field of the hydrodynamic parameter (transmissivity or hydraulic conductivity) is highly complex as the scale factor, the heterogeneous nature of the medium and experimental errors, at the scale of the model, often substantially reduce the significance of data obtained from any available local measurements. Therefore the problem remains unsolved: this is quite clear in the case of the carbonatic aquifer, for which the absence of information concerning the water table does not allow the reliability of the simulated piezometric field to be verified; it is less obvious but equally true for the simulation of alluvial aquifers in which the measured piezometric values are reproduced by postulating a reasonable but unmeasured water balance which is often affected by non negligible uncertainties.

**MODELLO MATEMATICO DELL'IDROSTRUTTURA DI MONTE COSCERNO**

Nel bacino del fiume Nera nei primi anni '90 vennero effettuate numerose misure di portata lungo il Nera ed i suoi affluenti principali, finalizzate ad individuarne i tratti drenanti. La portata complessivamente erogata, misurata nella stazione di Torre Orsina (210 m a.s.l.) ammonta a circa 18-19 m<sup>3</sup>/s come valore medio. L'attività di campo ha permesso di distinguere 5 sottosistemi nel bacino del Nera, di cui 4 ubicati in sinistra orografica, che costituiscono il sistema idrogeologico della Valnerina (Fig. 2), separati idraulicamente da motivi tettonici frequentemente compressivi, in cui il deflusso è orientato secondo direttrici meridiane da Sud a Nord, parallelamente ai principali assi tettonici.

La successione stratigrafica della Valnerina (Fig. 3) è costituita da un multilayer sedimentario a cui corrispondono tre acquiferi potenziali: quello del Calcarea massiccio-Corniola, quello della Maiolica, quello della Scaglia, separati da complessi a permeabilità ridotta (aquitard del Complesso calcareo-silico-marnoso e aquitard delle Marne a Fucoidi). Le sezioni di misura sono state poste lungo i corsi d'acqua in corrispondenza dei limiti fra complessi a differente

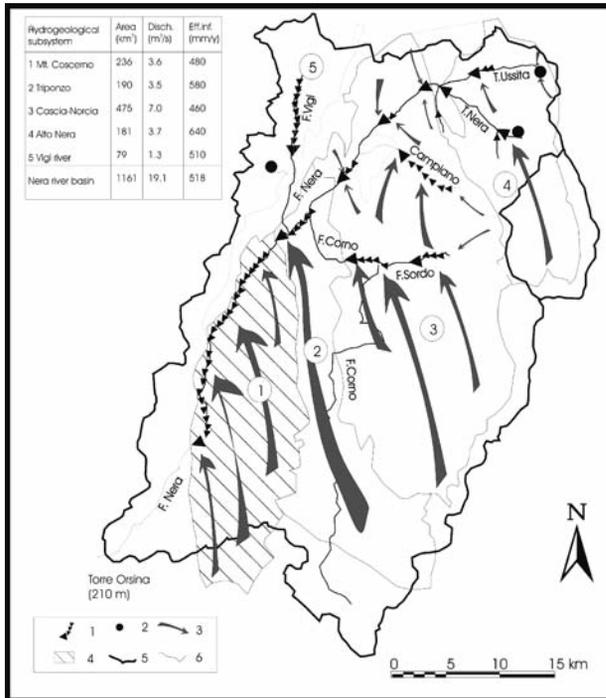


Fig. 2 - Schema semplificato della circolazione idrica sotterranea nel bacino del Nera a monte di Torre Orsina, con l'ubicazione delle principali sorgenti lineari e localizzate. Dati del 1991-1993 (da PREZIOSI, 2007). LEGENDA: 1) Sorgente lineare; 2) sorgente localizzata; 3) direzione presunta del flusso idrico sotterraneo; 4) area del modello numerico; 5) limiti del bacino idrografico; 6) limiti dei sottosistemi

- Simplified sketch of the groundwater circulation showing the location of the main linear and point springs in the Nera basin, upstream from Torre Orsina. Data from 1991-1993 (from Preziosi, 2007). LEGEND : 1) linear spring; 2) point spring; 3) assumed direction of groundwater flow; 4) numerical model area; 5) boundary of hydrographic basin; 6) subsystem boundary

**MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDROSTRUCTURE OF MT COSCERNO**

In the early 1990s numerous flow rate measurements were performed in the Nera river basin along the river itself and its principal tributaries aimed at identifying the draining stretches along the watercourses. The overall flow rate at Torre Orsina hydrographic station (210 m a.s.l.) amounts to about 18-19 m<sup>3</sup>/s on average. The field activity allowed 5 subsystems to be identified for the Nera basin, 4 of which located on the left side and making up the hydrogeological system of the Valnerina (Fig. 2), hydraulically separated by often compressive tectonic features, in which groundwater flow is oriented from South to North, parallel to the principal tectonic axes. The numerical model of the hydrostructure of Mt.Coscerno is described in this note.

The stratigraphic sequence of Valnerina (Fig. 3) is composed of a sedimentary multilayer corresponding to three potential aquifers: that of the Calcarea massiccio-Corniola limestone, that of the Maiolica limestone, and that of the Scaglia limestone, separated by complexes with a reduced permeability (calcareous-silicious-marly Complex aquitard and the Marne a Fucoidi aquitard). The discharge measurement sections were positioned along the watercourses so that they

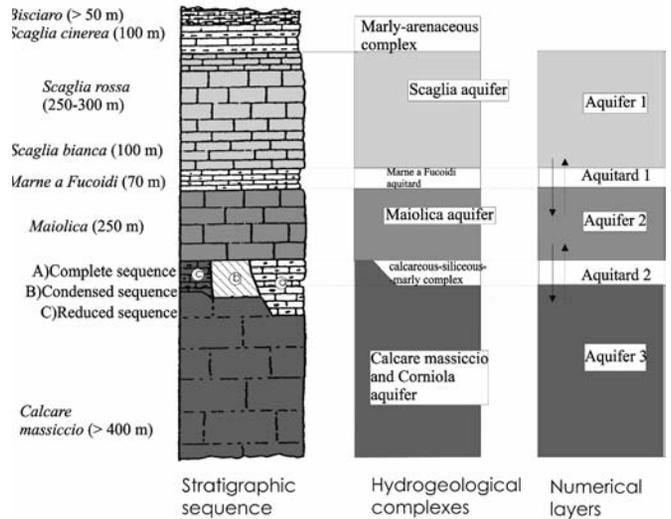


Fig. 3 - Schematizzazione dei rapporti fra successione stratigrafica umbromarchigiana, complessi idrogeologici (acquiferi, aquitards e aquicludes) in cui sono raggruppate le litologie e strati per il modello numerico (da PREZIOSI, 2007)

- Schematic representation of the relations among the stratigraphic succession of the Umbria-Marche area, the hydrogeological complexes (aquifers, aquitards and aquicludes) into which the lithologies are grouped and the layers of the numerical model (from PREZIOSI, 2007)

permeabilità al fine di determinare l'apporto di acque sotterranee separatamente per ciascun complesso. L'obiettivo era di valutare quanto i tre acquiferi fossero, all'interno di una stessa idrostruttura, separati idraulicamente o viceversa completamente interconnessi a causa della tettonica spinta a cui sono state sottoposte le formazioni o dello spessore ridotto degli *aquitard*.

In funzione dell'assetto così individuato vengono definiti nel modello matematico uno strato unico (simulazione monostrato) oppure 2 o 3 strati numerici distinti, collegati idraulicamente mediante drainance in una simulazione multistrato (Fig. 3). Dei sottosistemi individuati in Fig. 2 si descrive il modello numerico dell'idrostruttura posta più a valle (Monte Coscerno).

Uno dei problemi caratteristici della modellazione di acquiferi in aree corrugate è quello di rappresentare in modo semplice un assetto idrogeologico complesso dovuta alla geometria delle strutture sottoposte a tettonica compressiva: è necessario fare delle assunzioni anche molto forti, in particolare relativamente al deflusso delle acque di infiltrazione lungo gli strati inclinati e alla estensione delle zone sature (PREZIOSI, 2007). In Fig. 4 sono mostrate le relazioni fra l'assetto geologico, l'assetto idrogeologico e gli strati del modello numerico del caso in esame.

L'idrostruttura di Monte Coscerno è un'anticlinale con geometria "a scatola" (BARCHI & LEMMI, 1996) che si estende per 235 km<sup>2</sup>. È costituita dai 3 acquiferi sovrapposti e separati da livelli a permeabilità ridotta, che alimentano il fiume Nera con una portata di circa 3.5 m<sup>3</sup>/s variabile fra 2.5 e 4 m<sup>3</sup>/s (BONI & PREZIOSI, 1993). La connessione verticale fra i 3 acquiferi, simulata dal modello come drainan-

corresponded to the limits between complexes having different permeabilities in order to determine the groundwater contribution to the river base flow for each complex separately. The aim was to determine the extent to which the three aquifers, located inside the same hydrostructure, were hydraulically separated or, conversely, completely interconnected as a result of the tectonic thrust to which the formations had been subjected or of the thinness of the aquitards.

Depending on the configuration resulting from the hydrogeological analysis, a single layer (monolayer simulation) can be defined in the mathematical model as well as 2 or 3 separate layers, hydraulically linked by leakage in a multilayer simulation (Fig. 3). Between the subsystems identified in Figure 2 has been described the mathematical model of the hydrostructure located further downstream (Mt. Coscerno).

A typical problem encountered in modelling aquifers in strongly deformed terrains is how to give a simple representation of a complex hydrogeological configuration resulting from the geometry of the structures subjected to compressive tectonics: it is necessary to make certain often rough assumptions, e.g. with reference to the extension of the saturated zones (PREZIOSI, 2007). Figure 4 shows the relations between the geological configuration, the hydrogeological configuration and the layers of the numerical model in the case in question in a schematic section across Mt. Coscerno.

The Mt Coscerno hydrostructure consists of an anticlinal with a "box fold" type geometry (BARCHI & LEMMI, 1996) extending some 235 km<sup>2</sup>. It is made up of 3 superimposed aquifers separated by lay-

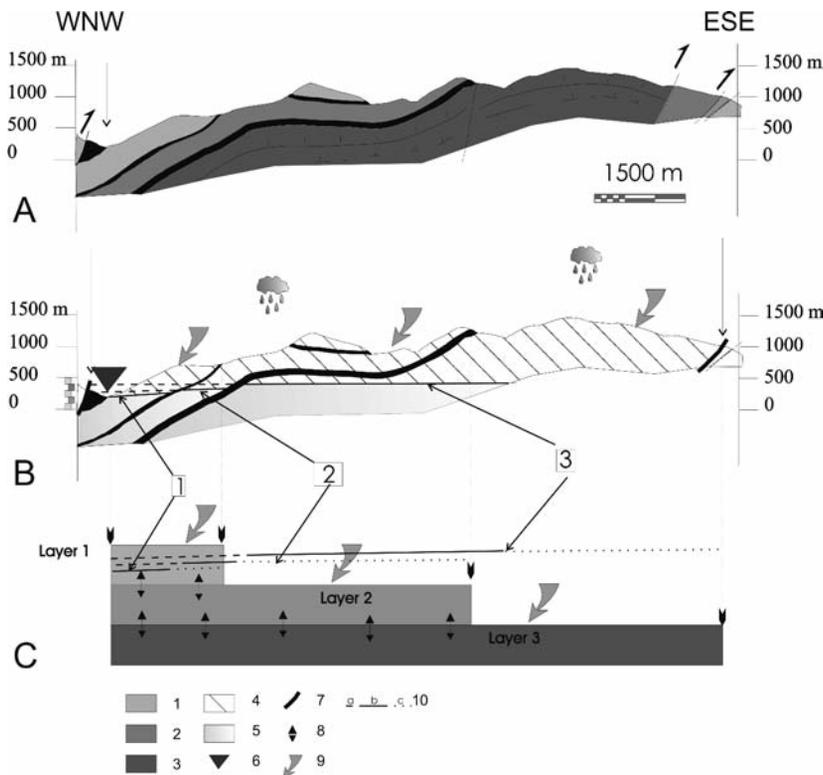


Fig. 4 - Relazioni fra (A) assetto geologico, (B) acquiferi e (C) modello numerico mostrate in un profilo schematico attraverso Monte Coscerno (modificato da Preziosi, 2007). LEGENDA: 1) acquifero della Scaglia; 2) acquifero della Maiolica; 3) acquifero del Calcere massiccio-Corniola; 4) zona insatura; 5) zona satura; 6) sorgente lineare; 7) limite a flusso nullo; 8) flusso di drainance; 9) infiltrazione efficace; 10) potenziale idraulico: a) imprigionato, b) libero, c) fittizio

- Relations among (A) geological framework, (B) aquifers and (C) numerical model shown in a schematic cross section across Mt. Coscerno (modified from PREZIOSI, 2007). LEGEND: 1) Scaglia aquifer; 2) Maiolica aquifer; 3) Calcere massiccio-Corniola aquifer; 4) unsaturated zone; 5) saturated zone; 6) linear spring; 7) no flow limit; 8) leakage; 9) recharge; 10) aquifer potential: a) confined; b) phreatic; c) fictitious

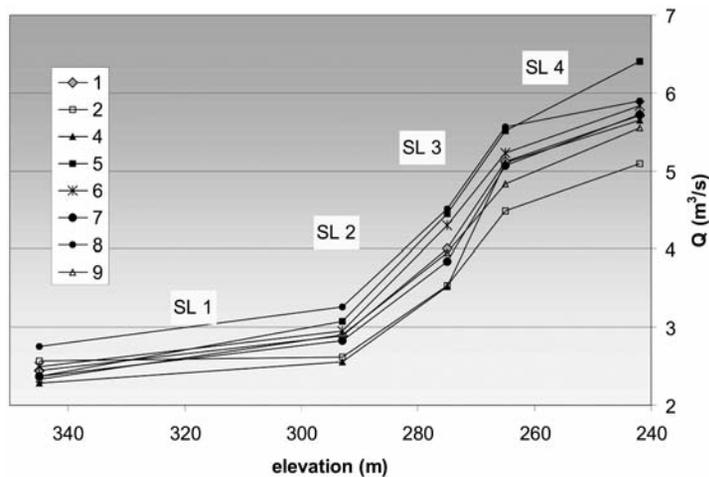


Fig. 5 - Variazione della portata del fiume Nera in funzione della quota, nell'area di indagine attraverso l'idrostruttura di Monte Coscerno. LEGENDA: 1) media delle misure. Valori relativi alle differenti campagne del periodo 1991-1993: 2) Ottobre 1991; 3) Giugno 1992; 4) Luglio 1992; 5) Dicembre 1992; 6) Febbraio 1993; 7) Marzo 1993; 8) Giugno 1993; 9) Luglio 1993  
 - Nera river flow rate variation as a function of the altitude of the investigated river across Monte Coscerno hydrostructure. LEG-  
 END: 1) mean value of measurements. Values referring to the var-  
 ious measurement campaigns of the period 1991-1993: 2) October  
 1991; 3) June 1992; 4) July 1992; 5) December 1992; 6) February  
 1993; 7) March 1993; 8) June 1993; 9) July 1993

ce, è assicurata sia da eventuali lacune di sedimentazione delle formazioni meno permeabili che da elementi tettonici trasversali o longitudinali alla struttura.

I dati a disposizione non permettono di valutare se il sistema in esame sia assimilabile ad un sistema multifalda o monofalda. Tuttavia le misure di portata seriate effettuate in differenti periodi dell'anno nel periodo 1991-1993 hanno messo in evidenza come l'idrostruttura del Monte Coscerno alimenti il fiume Nera con una portata distribuita in modo disuniforme rispetto alla quota del corso d'acqua (Fig. 5). Le misure mostrano infatti che l'aumento della portata per dislivello unitario è più marcato nella porzione centrale del tratto in esame (SL 2 e SL3), suggerendo la presenza di elementi tettonici o litostratigrafici che, costituendo ostacoli o viceversa vie preferenziali di deflusso, favoriscono il deflusso verso questo settore dell'idrostruttura.

La calibrazione in regime stazionario nel caso in esame ha come obiettivo di far corrispondere la portata calcolata per ciascun tratto di fiume con quella sperimentale (Tab. 1); la ricarica attribuita al modello corrisponde alla portata totale erogata, cioè 3.3 m<sup>3</sup>/s ed è distribuita su cinque topoi in modo proporzionale alla precipitazione efficace calcolata per ciascuno dei pluviometri operativi nell'area nel periodo di osservazione (1991-1993).

I primi tentativi svolti con un modello "monostrato" (BONI & PREZIOSI, 1994) non hanno portato a dei risultati soddisfacenti, segno evidente che l'ipotesi dell'acquifero unico, ancorché non omogeneo, non era sufficientemente realistica. Per questo motivo si è tentata la strada della simulazione con i tre strati sovrapposti, collegati idraulicamente per drainance, che ha portato a risultati decisamente più

Tratto di fiume River stretch	Quota (m) da-a Altitude (m) from-to	Incremento medio misurato (m <sup>3</sup> /s) Mean measured increase (m <sup>3</sup> /s)
SL 1	345 - 293	0.44
SL 2	293 - 275	1.12
SL 3	275 - 265	1.11
SL 4	265 - 242	0.6
TOTALE TOTAL	345 - 242	3.27

Tab. 1 - Incremento medio della portata misurata nei diversi tratti di fiume  
 - Mean measured discharge increase for different river stretches

ers with a reduced permeability feeding the Nera river at a flow rate of about 3.5 m<sup>3</sup>/s varying from 2.5 to 4 m<sup>3</sup>/s (BONI & PREZIOSI, 1993). The vertical connection between the three aquifers, simulated in the model as leakage, is provided either by sedimentation gaps in the less permeable formations as well as by tectonic elements running transversal or longitudinal to the structure.

Available data do not allow us to determine whether the system under investigation may be compared to a multi-aquifer or a single aquifer system. Nevertheless, the serial discharge measurements performed at different times of the year in the period 1991-1993 shows how the Mt Coscerno hydrostructure feeds the Nera river with a flow rate that is unevenly distributed vis-à-vis the altitude of the watercourse (Fig. 5). Indeed it can be observed that the increase per unit length in flow rate is more pronounced in the central portion of the stretch considered (SL 2 and SL3), thus suggesting the presence of tectonic or lithostratigraphic elements which favour the outflow towards this sector of the hydrostructure.

Steady-state calibration in the case in question is aimed at getting the flow rate calculated for each stretch of river to coincide with the experimental value (Tab. 1); the recharge attributed to the model corresponds to the total flow rate supplied, i.e. 3.3 m<sup>3</sup>/s and is distributed over 5 Thiessen polygons proportionately to the effective rainfall calculated for each of the rain gauges in operation in the area during the observation period (1991-1993).

The first attempts carried out using a "monolayer" model (BONI & PREZIOSI, 1994) were relatively unsuccessful, a clear sign that the hypothesis of the single aquifer, albeit non homogeneous, was not

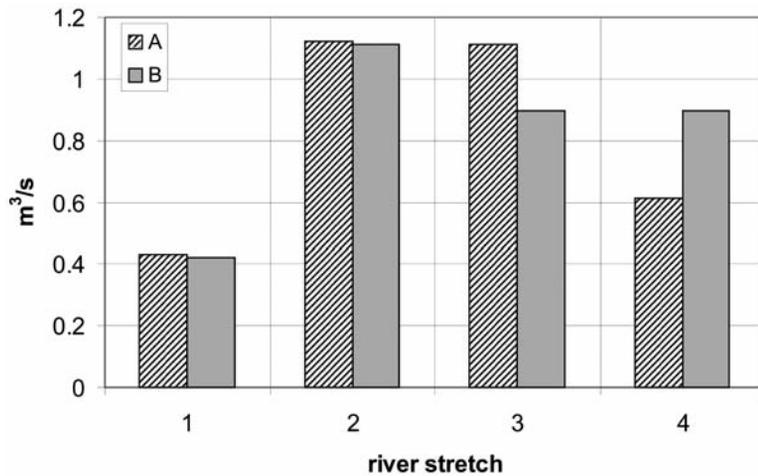


Fig. 6 - Confronto fra portata osservata (a: media aritmetica dei valori misurati nel periodo di osservazione) e la portata calcolata dal modello numerico in regime permanente (B) per ogni tratto di fiume considerato come sorgente lineare (1-4 da monte verso valle)  
 - Comparison between observed discharge (A: arithmetic mean of the values measured during the observation period) and the discharge calculated by the steady state model (B) for each stretch of river considered as a linear spring (1-4 in a downstream direction)

interessanti. In figura 6 è mostrato il confronto fra le portate calcolate per ciascun tratto di fiume assimilato ad una sorgente lineare e la media dei valori misurati nel periodo di osservazione.

Una delle peculiarità della modellazione di tali strutture è, come già detto, la assenza o rarità di informazioni riguardanti l'andamento della superficie piezometrica all'interno dell'idrostruttura, per cui il campo dei potenziali non è noto e non può essere utilizzato quale target nella calibrazione del modello. Viceversa la simulazione, calibrata mediante il confronto con la distribuzione delle portate erogate alle sorgenti fornisce una superficie piezometrica calcolata coerente con tutte le informazioni disponibili, compreso l'assetto geologico e la superficie topografica.

Nel caso in esame i gradienti calcolati variano dal 5% all'1.5% nell'acquifero basale and dal 5% al 4-6% negli acquiferi intermedio e superiore; i gradienti più elevati sono calcolati in prossimità delle sorgenti lineari. L'andamento delle superfici è regolare da Sud a Nord nell'acquifero basale, coerentemente con quanto ipotizzato sulla base dell'analisi idrogeologica regionale (Fig. 2), mentre mostra un assetto influenzato da fattori locali negli strati superiori. I valori di  $T$  risultanti dalla calibrazione variano da  $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Sulla base del campo dei potenziali e della distribuzione della trasmissività risultanti dalla calibrazione in regime stazionario sono state effettuate delle simulazioni in regime transitorio, utilizzando valori del coefficiente di immagazzinamento molto diversi in ciascuna simulazione (variabili da  $5 \cdot 10^{-4}$  a 0.2). Il target in questo caso è il regime dell'incremento della portata misurato nel tratto di fiume in esame. La ricarica mensile è stata ricavata dalla precipitazione misurata in 5 pluviometri del Servizio Idrografico nel periodo di osservazione, da cui è stata detratta l'evapotraspirazione reale calcolata col noto metodo di Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948). Il confronto avviene fra la portata erogata dal modello nella simulazione al passo di tempo mensile ed i valori di incremento della portata misurati nel tratto di fiume in esame.

Nella calibrazione in regime transitorio sono stati modificati i valori attribuiti al coefficiente d'immagazzinamento, attribuendo

sufficiently realistic. For this reason the approach involving three superimposed layers, hydraulically connected by leakage, was attempted and led to decidedly more interesting results. Figure 6 shows a comparison between flow rates calculated for each stretch of the river likened to a linear spring and the mean values measured during the observation period.

One of the peculiarities encountered in modelling such structures is, as has been seen, the absence or rarity of information concerning the piezometric surface inside the hydrostructure, so that the piezometric field is unknown and cannot be used as a target in calibrating the model. Conversely, simulation, calibrated through the comparison with the distribution of flow rates supplied to the springs, provides a calculated piezometric surface consistent with the available information, including the geological configuration and the topographic area.

In the present case the calculated gradients vary from 5% to 1.5% in the basal aquifer and from 5% to 4-6% in the intermediate and upper aquifers, the steepest gradients being calculated close to the linear springs; the piezometric surface trend is regular from South to North in the basal aquifer, consistent with what was postulated on the basis of the regional hydrogeological analysis (Fig. 2), whereas it displays a configuration that is strongly influenced by local factors in the upper layers. The values of  $T$  deriving from calibration vary from  $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

On the basis of the piezometric field and transmissivity distribution, transient simulations were performed using widely varying storage coefficient values for each simulation (from  $5 \cdot 10^{-4}$  to 0.2). In this case the target was the regime of the increase in flow rate measured in each of the river stretch under investigation. The monthly recharge was obtained from the rainfall as measured in 5 rain gauges belonging to the Hydrographic Service during the observation period, from which the actual evapotranspiration computed using Thornthwaite's method (THORNTHWAITE, 1948) was subtracted. The comparison was carried out between the flow rate regime supplied by the model in the simulation at a monthly time step and the values of the increase in the

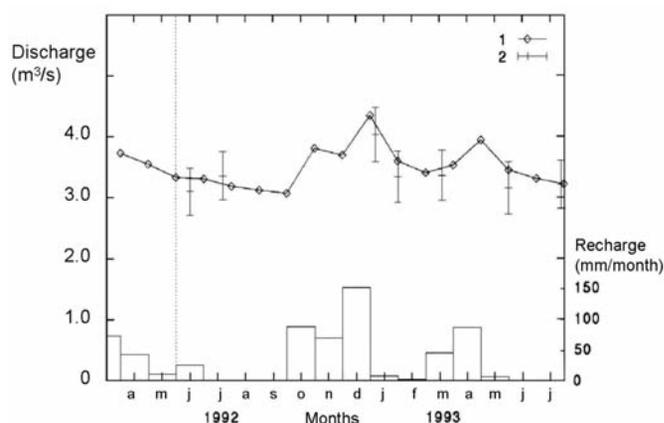


Fig. 7 - Confronto fra portata calcolata col modello in regime transitorio a passo di tempo mensile (1) e incremento nella portata misurata nel periodo di osservazione (2). La barra verticale rappresenta l'errore sperimentale. L'istogramma in basso rappresenta la ricarica all'aquifero

- Comparison between flow rate calculated using transient model at monthly time steps (1) and the increase in flow rate measured in the river during the observation period (2). The bar represents experimental error. The histogram at the bottom represents aquifer recharge

valori inferiori di circa un ordine di grandezza alle porzioni di acquifero presumibilmente confinate. I valori che hanno fornito il confronto migliore fra portate simulate e calcolate (Fig. 7) sono  $5-6 \cdot 10^{-2}$  (acquifero freatico) e  $6 \cdot 10^{-3}$  (acquifero confinato).

Il modello descritto è stato successivamente sottoposto a validazione utilizzando altri set di dati di afflussi/deflussi, in particolare utilizzando serie storiche degli anni '30 del secolo scorso, quindi utilizzato per simulare scenari di tipo gestionale (PREZIOSI *et alii*, 1993; PREZIOSI (2007): cosa succede se si preleva da alcuni pozzi ubicati in tre diverse aree, per 30 anni una portata costante pari a  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  (86% della ricarica annua) o  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$  (26% della ricarica annua). I risultati dei calcoli (Fig. 8) mostrano come l'impatto dei prelievi, risentito in modo differenziato nei diversi tratti di fiume in funzione della loro ubicazione rispetto ai punti di captazione, sia marcato già a partire dal primo anno, in particolare nel caso del prelievo più consistente in cui la portata erogata al corso d'acqua diminuisce di quasi il 60%. Nel complesso nel primo caso risulta alterato fortemente in breve tempo l'equilibrio idrodinamico dell'area, mentre nel secondo gli effetti risultano molto più contenuti anche a medio-lungo termine.

### MODELLO MATEMATICO DELL'ACQUIFERO ALLUVIONALE DI PETRIGNANO D'ASSISI

Il secondo caso presentato è l'aquifero di Petrignano d'Assisi, ubicato nella Valle Umbra, il cui modello è stato recentemente sviluppato dall'IRSA-CNR nell'ambito di una convenzione con l'ARPA Umbria. L'aquifero di Petrignano è costituito da depositi alluvionali che poggiano su di un substrato marnoso-arenaceo del Miocene, bordati a Sud, Ovest e Nord-Est da depositi lacustri e fluvio-lacustri del Villafranchiano, che costituiscono un limite idraulico a flusso nullo (Fig. 9). Il fondo dell'aquifero è stato ricostruito mediante tec-

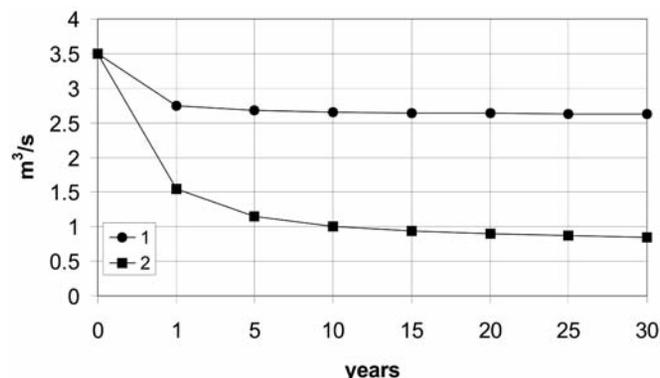


Fig. 8 - Variazione della portata residua delle sorgenti lineari e localizzate considerando un prelievo pari a  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$  (1) e  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  (2) per 30 anni. La portata nelle condizioni indisturbate ammonta a  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$

- Variation in residual discharge of the point and linear springs assuming a withdrawal of  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$  (1) and  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  (2) over 30 years. The flow rate of the undisturbed situation corresponds to about  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$

flow rate as measured in the stretch of river.

The calibration in transient conditions was carried out assigning to the storage coefficient values about one order of magnitude lower to the portions of the aquifer that are presumably confined. The values providing the best comparison between simulated and computed flow rates (Fig. 7) are  $5-6 \cdot 10^{-2}$  (phreatic aquifer) and  $6 \cdot 10^{-3}$  (confined aquifer).

The model described was successively validated using other rainfall-runoff data, in particular a historical series dating to the 1930s, and was then used to simulate management scenarios (PREZIOSI *et alii*, 1993; PREZIOSI (2007): what happens if withdrawals are made from several wells located in different areas for 30 years at a constant flow rate of  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  (86% of annual recharge) or  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$  (26% of annual recharge). The results of the calculation (Fig. 8) show how the impact of the withdrawals, experienced to different degrees in the various stretches of the river depending on their location vis-à-vis the withdrawal points, is pronounced right from the first year, in particular in the case of the larger withdrawal in which the flow rate supplied to the watercourse is reduced by nearly 60%. Overall, in the first case, the hydrodynamic balance of the area is very quickly upset, whereas in the second the effects are much more limited also in the medium-long term.

### MATHEMATICAL MODEL OF THE ALLUVIAL AQUIFER OF PETRIGNANO D'ASSISI

The second case presented is the aquifer of Petrignano d'Assisi (Fig.9), located in the Valle Umbra, the model of which was recently developed by IRSA-CNR within the framework of an agreement with ARPA Umbria. The Petrignano aquifer is formed by alluvial deposits overlying a marly-arenaceous substrate of the Miocene, bordered to the South, West and North-East by lacustrine and fluvio-lacustrine Villafranchian deposits, which represent a no flow hydraulic limit (Fig. 9). The aquifer bottom was reconstructed using

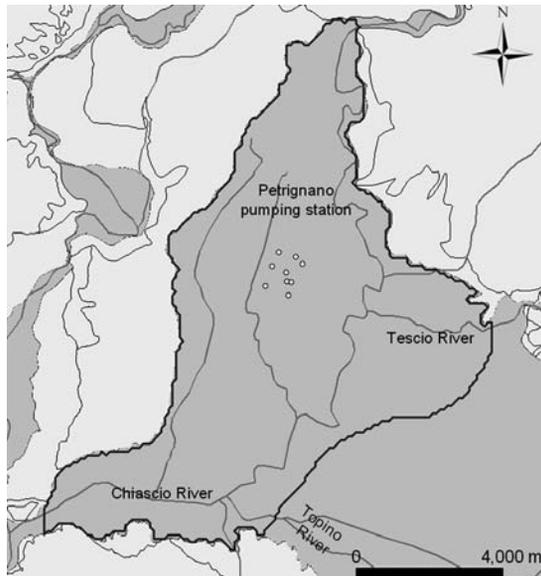


Fig. 9 - Rappresentazione schematica dell'area di studio. I sedimenti alluvionali del Quaternario sono in grigio scuro, i depositi Villafranchiani e altre litologie a bassa permeabilità sono in grigio chiaro. I punti mostrano la posizione del campo pozzi di Petignano. La linea in grassetto indica i confini del modello matematico

- Schematic representation of the study site. Quaternary alluvial sediments are shown in dark grey, fluvio-lacustrine Villafranchian deposits and other less permeable lithologies are in light grey. Dots show the position of the Petignano pumping station wells. The bold line indicates the boundaries of the mathematical model

niche di tipo geostatistico sulla base delle stratigrafie di pozzo disponibili (circa 40) e di indagini geoelettriche progressive.

All'interno dell'area di studio è in funzione dalla fine degli anni '70 un campo pozzi che preleva circa 300 l/s per un bacino di utenza di 240.000 abitanti. Insistono inoltre sull'acquifero prelievi per uso agricolo e industriale.

La piezometria del 1974, relativa ad una situazione considerata indisturbata (Fig. 10a), è stata ricostruita mediante kriging sulla base dei dati puntuali forniti da ARPA e mostra un andamento della falda da Nord a Sud con un asse di deflusso principale nella zona centrale della piana, parallelo al fiume Chiascio che scorre sul lato orientale.

L'attivazione del campo pozzi di Petignano, ed il progressivo sfruttamento dell'acquifero a scopi agricoli, ha indotto un cono di depressione nella parte centrale della piana determinando così una variazione del deflusso naturale della falda (Fig. 10b).

Sulla base dei dati di letteratura disponibili (BOILA *et alii*, 1991; MARCHETTI & MARTINELLI, 1991; CHIODINI *et alii*, 1991) sono state avanzate le seguenti ipotesi sul bilancio globale (Tab. 2):

1. L'acquifero è alimentato principalmente dall'infiltrazione verticale di acque meteoriche, valutabili tra 140 e 280 mm/a, corrispondenti ad una portata variabile tra 330 e 660 l/s (BOILA *et alii*, 1991).
2. Studi condotti sulle portate misurate tra sezioni idrometriche successive del Chiascio (CESAP, 1991) hanno evidenziato una possibile alimentazione dal fiume all'acquifero pari a circa 180 l/s.
3. L'andamento del campo piezometrico sia in condizioni indisturbate (1974, Fig. 10a), sia in condizioni di sfruttamento (2004, Fig. 10b) mostra una possibile alimentazione per infiltrazione dai versanti orientale e occidentale nei periodi piovosi. Tale infiltrazione è stata valutata globalmente pari a circa 100 l/s.
4. Queste tre voci sommate corrispondono quindi ad un bilancio

geostatistical techniques applied to available well stratigraphies (about 40) and previous geoelectrical surveys.

The plain is crossed along the N-S direction by the Chiascio River, whose is supposed to be in hydraulic contact with the underlying aquifer. Inside the investigated area, ever since the late 1970s, a pumping station has been in operation which withdraws about 300 l/s to supply a user basin of some 240,000 inhabitants. The aquifer is exploited also for agricultural and industrial purposes.

The 1974 piezometry, referring to a situation deemed undisturbed (Fig. 10a), was reconstructed by means of kriging on the basis of point data provided by ARPA and reveals a North-South trend of the layer with a principal flow axis in the central zone of the plane, parallel to the Chiascio river, which flows on the eastern side.

The activation of the Petignano pumping station, and the progressive exploitation of the aquifer both for human consumption and for agricultural purposes, has produced a cone of depression in the central part of the plain, thus determining a variation of the natural flow direction (Fig. 10b).

On the basis of available literature data (BOILA *et alii*, 1991; MARCHETTI & MARTINELLI, 1991; CHIODINI *et alii*, 1991) the following hypotheses concerning the global balance were advanced (Tab. 2):

1. The aquifer is fed mainly by the vertical infiltration of rain water, estimated between 140 and 280 mm/y, corresponding to a flow rate varying between 330 and 660 l/s (BOILA *et alii*, 1991).
2. Studies of the flow rates measured between successive hydrometric sections of the Chiascio (CESAP, 1991) indicate a possible feeding of the aquifer by the river of about 180 l/s.
3. Both the piezometric fields in undisturbed conditions (1974, Fig. 10a) and under exploitation (2004, Fig. 10b) indicates a possible feeding by infiltration from the eastern and western slopes during the rainy season. This infiltration was estimated at around 100 l/s.
4. The sum of these three terms thus corresponds to an inflow vary-

(inflow) variabile da 610 a 940 l/s nelle due ipotesi relative alla ricarica zenitale, che dovrebbero corrispondere in condizioni medie ad un analogo contributo della falda al corso d'acqua.

5. Il Chiascio agisce come dreno alla falda nel tratto centrale e meridionale. I dati relativi alla portata del corso d'acqua disponibili non permettono di definire nel dettaglio tale incremento, tuttavia si evidenzia un aumento della portata del Chiascio, escluso il Topino, dell'ordine di 1 m<sup>3</sup>/s nell'area in esame: i valori ipotizzati di inflow appaiono dunque ragionevoli

Relativamente alle caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero, sono disponibili 6 prove di portata distribuite su tutta la piana, che hanno fornito stime di *K* variabili tra 10<sup>-3</sup> a 10<sup>-6</sup> m/s, evidenziando l'elevato range di variabilità di questo parametro nell'area di studio.

Sulla base delle informazioni prima elencate, è stato implementato un modello di flusso dell'acquifero mediante il codice alle differenze finite MODFLOW (MCDONALD & HARBAUGH, 1988), con lo scopo di verificare la compatibilità fisica tra i dati di piezometria, conducibilità idraulica e termini di sorgente e tentare così di ridurre l'incertezza sul bilancio ipotizzato.

I dati a disposizione hanno permesso di ricostruire in modo relativamente dettagliato la geometria del sistema, in particolare il letto ed il tetto (corrispondente alla superficie freatica considerando il sistema a falda libera).

In figura 11 sono mostrati i limiti e le condizioni al contorno del modello, posti sui lati Est, Ovest e Sud in corrispondenza dei limiti del Villafranchiano; a Sud-Ovest invece, dove la piana alluvionale prosegue verso Sud a comprendere la piana del Topino, è stato necessario chiudere l'area del modello in corrispondenza di un limite idraulico, parallelamente alle linee di flusso desunte dall'andamento della piezometria indisturbata relativa al 1974; i dati piezometrici relativi al periodo 1998-2004, rappresentativi quindi di una situazione di sfruttamento dell'acquifero, mostrano che tale limite idraulico a flus-

ing from 610 to 940 l/s in the two hypotheses referring to the effective rainfall infiltration of 140 and 280 mm/y (see point 1), which under average conditions should correspond to a comparable contribution from the aquifer to the watercourse.

5. The Chiascio acts as a drain for the aquifer in the central and southern (downstream) stretches. The available historical data referring to watercourse flow do not allow this increase to be determined in detail; nevertheless, an increase is observed in the Chiascio flow rate, excluding the Topino, of the order of 1 m<sup>3</sup>/s in the area under examination: the postulated inflow values thus seem reasonable.

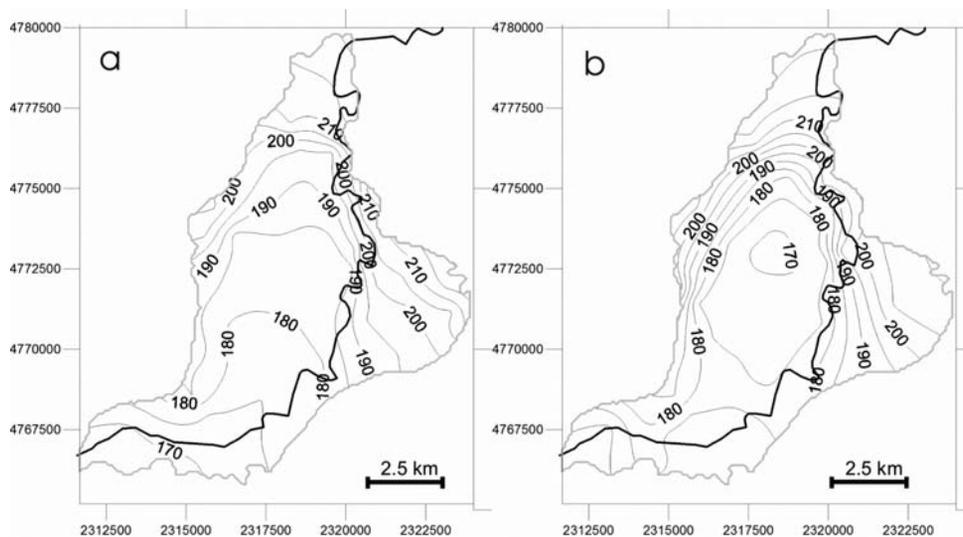
With reference to the aquifer's hydrodynamic characteristics, 6 pumping tests distributed over the entire plain are available, and provide estimates of *K* varying from 10<sup>-3</sup> to 10<sup>-6</sup> m/s, thus highlighting the wide range of variability affecting this parameter in the area under study.

On the basis of the information listed above, a flow model was implemented for the aquifer using the finite difference MODFLOW code (MCDONALD & HARBAUGH, 1988) with a view to verifying the physical compatibility between the piezometric data, hydraulic conductivity and source terms, and thus to reducing the uncertainty of the postulated balance.

The available data allowed a relatively detailed reconstruction to be made of the aquifer geometry, in particular of the bottom and the top (corresponding to the phreatic surface considering the unconfined aquifer system).

Figure 11 shows the limits and boundary conditions of the model situated on the East, West and South sides, corresponding to the Villafranchian limits; to the South-West, on the other hand, where the alluvial plain continues southward and takes in the Topino plain, it was necessary to define the area of the model considering a hydraulic limit parallel to the flow lines evaluated from the undisturbed piezometry of 1974; the piezometric data referring to the period 1998-2004, and thus representative of conditions of aquifer exploitation, show

Fig. 10 - a: superficie piezometrica relativa al 1974; b: superficie piezometrica relativa al 2004 (m s.l.m.; equidistanza 5 m)  
- a: head contour referring to the year 1974; b: head contour referring to the year 2004 (m a.s.l.; 5 m spacing)



	MOD1 (140 mm y1)	MOD2 (200 mm y1)	MOD3 (280 mm y1)
TERMINI SORGENTE <i>SOURCE TERMS</i>			
Infiltrazione efficace <i>Effective Infiltration</i>	330 l s	465 l s	660 l s
Flusso laterale <i>flow from external slopes</i>		120 l s	
Perdite dal Chiascio <i>Chiascio losses</i>		180 l s	
TOTALE ENTRATE <i>TOT. INFLOW</i>	330 l s	751 l s	660 l s
Emungimenti puntuali <i>Point abstractions</i>		-110 l s	
Emungimenti diffusi per irrigazione <i>Widespread abstractions for irrigation</i>		-172 l s	
TOTALE EMUNGIMENTI <i>TOT. ABSTRACTIONS</i>		-612 l s	
PORTATA DRENO IN CONDIZIONI INDISTURBATE <i>DRAIN FLOW UNDER UNDISTURBED CONDITIONS</i>	330 l s	751 l s	660 l s
PORTATA DRENO IN CONDIZIONI DI SFRUTTAMENTO <i>DRAIN FLOW UNDER EXPLOITATION CONDITIONS</i>	11 s	130 l s	33 l s

Tab. 2 - Bilancio complessivo nelle differenti ipotesi di infiltrazione efficace, in condizioni indisturbate e di sfruttamento  
- *Total budget for different hypothesis of effective rain infiltration, under undisturbed and exploitation conditions*

so nullo non è variato nel tempo in maniera significativa. Nella medesima figura è mostrata l'ubicazione delle condizioni al contorno imposte (flusso nullo, flusso noto, perdite dal fiume, dreno).

Una prima simulazione della situazione indisturbata con una distribuzione di  $K$  in 6 zone omogenee relative ai valori sperimentali non ha fornito alcun risultato accettabile, mostrando che tale distribuzione non è compatibile con la piezometria misurata per nessuna delle tre ipotesi di bilancio considerate.

Per tale motivo si è proceduto alla calibrazione utilizzando un codice di inversione (MODAC, GUO & ZHANG, 2000), che identifica un possibile campo di conducibilità che riproduce il campo di  $h$  noto, imponendo il bilancio del sistema. Sono state considerate 3 diverse ipotesi di bilancio, in cui le entrate variano del 30% da MOD1 a MOD3 (Tab. 2); considerato l'assetto idrogeologico della piana, in condizioni stazionarie la somma algebrica dei termini di sorgente deve essere pari alla portata totale erogata dell'acquifero al Chiascio, indicata in tabella 2 come "portata dreno".

L'applicazione del modello inverso ha permesso di identificare 3 diverse distribuzioni di  $K$  i cui valori sono compresi nell'ampio range individuato dai dati sperimentali che consentono di simulare con il medesimo livello di accuratezza la piezometria di riferimento: le conducibilità ottenute dalla calibrazione variano prevalentemente fra  $10^{-5}$  e  $10^{-2}$  m/s.

Per definire quale delle tre ipotesi sia più rappresentativa nella simulazione dell'acquifero di Petrigliano si è proceduto alla validazione del modello, sempre in regime permanente, utilizzando come target per la simulazione una diversa situazione di flusso. È stata utilizzata quella relativa al 2004, anno in cui il cono di emungimento dovuto ai prelievi era particolarmente marcato con abbassamenti massimi rispetto al 1974 di circa una quindicina di metri.

Il bilancio in questo caso (Tab. 2) comprende anche le estrazioni per uso potabile, irriguo e industriale stimate in base a dati forniti dai gestori e all'idroesigenza colturale.

In figura 12a e 12b sono mostrati i risultati delle simulazioni MOD2 e MOD3 in termini sia di differenze in ogni piezometro tra altezze misurate e altezze modellate, sia di mappe piezometriche. Non sono riportati i risultati relativi a MOD1: dal momento che le

that this no flow hydraulic limit did not vary significantly over time. The same figure shows the location of the imposed boundary conditions (no flow, constant flow, losses from river to groundwater, drain).

A first simulation of the undisturbed situation with a trivial  $K$  distribution over 6 homogeneous zones related to the location of the experimental values provided no acceptable result, thus showing that this distribution was not compatible with the measured piezometry for any of the three balance hypotheses considered.

For this reason calibration was carried out using an inversion code (MODAC, GUO & ZHANG, 2000), which identifies a possible conductivity field that reproduces the known  $h$  field, imposing the aquifer water budget. Three different hypothetical budgets were considered in which the inflow varied by 30% from MOD1 to MOD3 (Tab. 2); considering the hydrogeological configuration of the plain, under stationary conditions, the algebraic sum of the source terms should be equal to the total flow rate supplied by the aquifer to the Chiascio, indicated in table 2 as "drain flow rate".

Application of the inverse model allowed 3 different distributions of  $K$  to be identified, the values of which lie within the wide range identified by the experimental data; the  $K$  distribution obtained allowed the reference piezometry to be reproduced with the same level of accuracy: the conductivity values obtained from the calibration mainly vary from  $10^{-5}$  to  $10^{-2}$  m/s.

In order to determine which of the three hypotheses was the most representative in the simulation of the Petrigliano aquifer, the model was validated, again in steady state conditions, using a different flow situation as target for the simulation. The situation selected was that referring to 2004, the year in which the cone of depression due to withdrawals was particularly pronounced, with maximum drawdown of about 15 metres compared with 1974.

In this case (Tab. 2) the balance comprises also withdrawals for drinking, irrigation and industrial uses, estimated on the basis regarding the data provided by ARPA Umbria.

Figures 12a and 12b show the results of the MOD2 and MOD3 simulations both in terms of differences in each piezometer between measured and modelled head and in terms of piezometric maps. No results are provided for MOD1: since total withdrawals

Fig. 11 - Condizioni al contorno del modello. Celle nere: flusso costante (106 l/s ai confini esterni e 180 l/s lungo il Chiascio); celle grigie: condizioni di dreno; celle bianche all'interno del dominio: ricarica da infiltrazione efficace. Dove non specificato diversamente sui confini esterni del dominio è stata assegnata una condizione di flusso nullo

- Model boundary conditions. Black cells: constant flow (106 l/s at the external boundaries and 180 l/s along Chiascio river); grey cells: drain condition; white cells inside domain: recharge by effective rainfall infiltration. Where not otherwise specified a no-flow boundary condition has been assigned on the edge of the domain

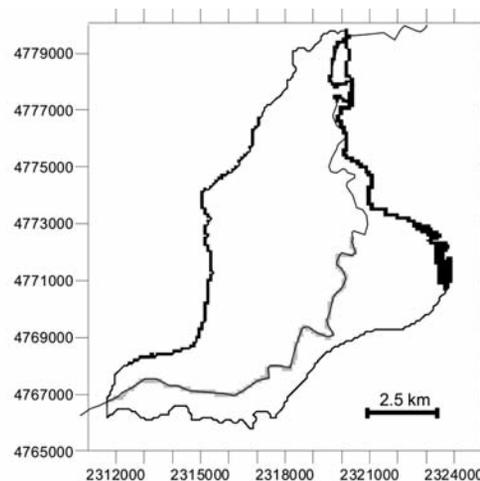
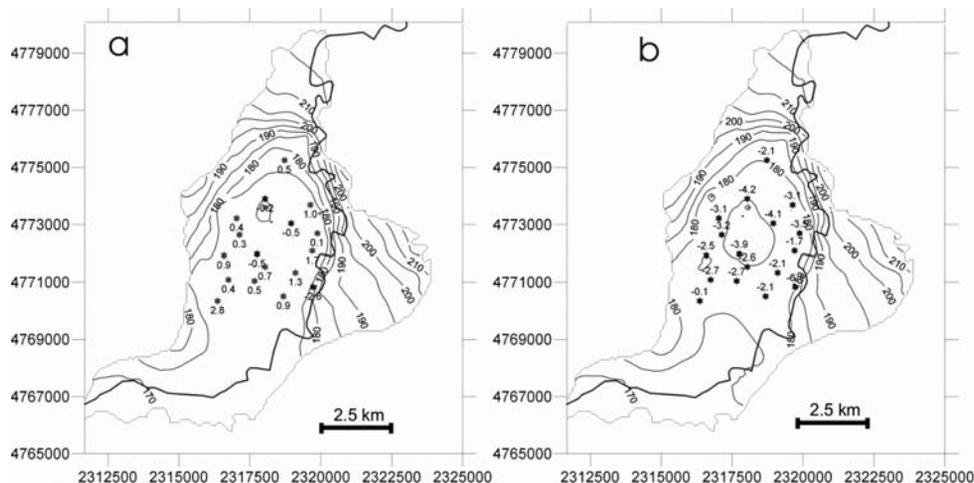


Fig. 12 - Superficie piezometrica calcolata da MOD2 (a) e MOD3 (b) in condizioni di sfruttamento dell'acquifero. I valori puntuali indicano la differenza tra l'altezza piezometrica misurata nei pozzi dell'area di studio e quella calcolata

- Head contour under conditions of aquifer exploitation as calculated by MOD2 (a) and MOD3 (b). The point values indicate the difference between piezometric heads measured in the well field area and the calculated piezometric heads



estrazioni totali (circa 600 l/s) sono sostanzialmente pari alla ricarica totale il modello in regime permanente calcola un numero elevato di celle "secche" (soprattutto nella parte alta del dominio di flusso), ma tale situazione non si è mai verificata sperimentalmente. La distribuzione di K relativa all'ipotesi di bilancio di MOD2 appare più adatta per simulare correttamente il campo piezometrico sperimentale, dal momento che MOD3 sovrastima sistematicamente le altezze piezometriche sperimentali.

Si può concludere, dunque, che un valore di infiltrazione efficace pari a 200 mm/a e la corrispondente distribuzione di K permette di simulare correttamente entrambe le situazioni di flusso considerate. Nel caso dell'acquifero di Petriignano, dunque, il vincolo rappresentato dal campo dei potenziali relativo a diverse situazioni di flusso permette di ridurre l'incertezza sul bilancio globale e di caratterizzare in maniera fisicamente coerente l'acquifero.

Sono attualmente in corso rilevamenti di terreno per tentare di definire meglio le relazioni falda-fiume, in particolare per quanto riguarda la possibile ricarica all'acquifero dovuta alle perdite dal

(about 600 l/s) are practically equal to the total recharge, the model in steady state conditions has a high number of "dry" cells (particularly in the upper part of the flow domain). However complete depletion of the aquifer has never been observed even during periods of strong overexploitation, hence the MOD1 hypothesis was rejected. Eventually the distribution of K from the MOD2 balance hypothesis would seem to be more suitable for a correct simulation of the experimental piezometric field, since MOD3 systematically overestimates the experimental piezometric heads.

It may thus be concluded that an effective infiltration value of 200 mm/y and the corresponding distribution of K allows both the flow situations considered (1974 and 2004) to be correctly simulated. In the case of the Petriignano aquifer, therefore, the constraint represented by the piezometric field referring to different flow situations makes it possible to reduce the uncertainty on the global balance and to characterize the aquifer in a physically coherent fashion.

Field investigations are currently under way to attempt to define the aquifer-river relations more accurately, particularly the possible

fiume Chiascio nel tratto più settentrionale e il flusso dall'acquifero verso il fiume nei tratti centrale e meridionale: alcune misure sperimentali della portata svolte nell'ottobre 2006 hanno sostanzialmente confermato l'apporto delle falde al flusso di base del Chiascio, ma è incerto il volume scambiato complessivamente. Purtroppo l'ordine di grandezza della variazione della portata del fiume nel tratto drenante è confrontabile con l'errore di misura insito nel metodo adottato (mulinello) e dunque non è possibile una misurazione sperimentale attendibile della portata scambiata. Ulteriori misure effettuate utilizzando altri metodi (ad esempio misure con traccianti) potranno fornire importanti elementi quantitativi per la calibrazione del modello di simulazione.

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati messi a confronto i modelli matematici di due acquiferi, diversi per permeabilità, assetto idrogeologico e per il dettaglio conoscitivo. In questa nota si è voluto mostrare come, nonostante la diversità dell'approccio nella ricostruzione dell'assetto idrogeologico dei due acquiferi presentati, basato essenzialmente in un caso sulla conoscenza del bilancio, nell'altro del campo dei potenziali, la validità dei modelli numerici descritti sia a nostro avviso confrontabile.

La stima dei parametri idrodinamici (conducibilità idraulica, trasmissività, coefficiente di immagazzinamento) a partire da dati sperimentali è soggetta fortemente al fattore di scala, pertanto la conoscenza del campo di questi parametri per l'elaborazione del modello è aleatoria e non sempre può costituire un vincolo alla calibrazione.

Il campo dei potenziali  $h$  è legato al rapporto fra il bilancio  $Q$  e il campo dei parametri idrodinamici  $T$ , quindi per una stessa distribuzione di  $h$ , una variazione di un ordine di grandezza sulla  $T$  porta ad una analoga variazione sul bilancio. Questo mostra come la calibrazione del modello non sia unica, anche conoscendo perfettamente  $h$ , a meno di non conoscere anche il bilancio.

Nel caso dell'acquifero di Monte Coscerno:

- il modello realizzato sintetizza in modo coerente tutte le informazioni disponibili e riproduce in modo soddisfacente le condizioni idrologiche sperimentali;
- l'assetto geologico costituisce un vincolo importante: infatti il modello non riesce a riprodurre correttamente situazioni eccessivamente semplificate rispetto alla realtà;
- l'assenza di dati di controllo dei potenziali è un punto di debolezza della metodologia descritta; tuttavia l'esistenza di una serie di punti in cui la falda affiora in corrispondenza delle sorgenti lineari e localizzate, costituisce un vincolo al modello che permette di aumentare la confidenza nei risultati numerici;
- si ritiene che il modello proposto sia uno strumento valido ai fini della previsione dell'evoluzione delle portate erogate dall'acquifero;
- la approfondita conoscenza del regime di deflusso e della ubicazione delle sorgenti lineari alimentate dalla idrostruttura sofferisce alla carenza di informazioni sui campi dei potenziali idrau-

recharge to the water table due to losses from the Chiascio river in its upper course within the Petignano plain and conversely the outflow of the aquifer to the river in the middle and lower course. Several flow rate measurements carried out in October 2006 essentially confirmed the contribution by the aquifer to the base flow of the Chiascio, even though the overall volume of the exchange is uncertain. Unfortunately, the order of magnitude of the sought-after discharge variation is comparable to the error of the method used for measurements (current meter) and could not be determined. Some uncertainty therefore remains concerning the flow rate into the Chiascio. Further investigations using other methods e.g. tracers, could provide quantitative information for a better calibration of the model.

## CONCLUSIONS

In the present work a comparison was made among models referring to two aquifers that differ in type of permeability, hydrogeological framework and in the field data available for their characterization and calibration. The aim of the present note was to show how, despite the different approaches followed in reconstructing the hydrogeological configuration of the two described aquifers, based essentially in one case on a knowledge of the water budget, and in the other of the piezometric field, the reliability of the described numerical models is comparable.

The estimation of the hydrodynamic parameters (hydraulic conductivity, transmissivity, storage coefficient) based on experimental data is strongly linked to the scale factor. Therefore a knowledge of these parameters for the processing of the model is uncertain and does not always represent a constraint on its calibration.

The piezometric field  $h$  is linked to the ratio between the balance  $Q$  and the field of hydrodynamic parameters  $T$ , and so for the same distribution of  $h$ , the variation of one order of magnitude in  $T$  leads to a comparable variation in the balance. This shows that the knowledge of both the piezometric field and the water balance is necessary in order to build a reliable simulation model.

In the case of the Mt Coscerno aquifer:

- the model built provides a coherent synthesis of all the information available and satisfactorily reproduces the experimental hydrological conditions;
- the geological configuration represents a significant constraint: indeed the model fails to provide a correct reproduction of situations that are oversimplified with respect to the real conditions;
- the lack of control data referring to the potentials is a weakness in the described method; nevertheless, the existence of a series of points in which the aquifer emerges corresponding to point or linear springs represents a constraint on the model that enhances confidence in the numerical results;
- the proposed model is deemed to be a valid tool for predicting the evolution of the flow rates supplied by the aquifer;
- the thorough knowledge available concerning the discharge regime and the location of the linear springs supplied by the hydrostructure makes up for the lack of information regarding the hydraulic

lici. Tuttavia poter disporre di anche solo alcuni punti noti per vincolare le piezometrie permetterebbe di calibrare un modello di flusso capace di fornire risposte esaurienti rispetto a diversi scenari di gestione o climatici. Un siffatto modello permetterebbe di prevedere in modo più attendibile ed accurato rispetto all'esempio descritto l'evoluzione delle portate residue del corso d'acqua in presenza di prelievi da pozzi nell'idrostruttura o di carenza di ricarica in periodi siccitosi prolungati.

Nel caso dell'acquifero di Petriignano:

- il modello matematico realizzato sintetizza in modo coerente tutte le informazioni disponibili e riproduce in modo soddisfacente il campo dei potenziali idraulici con una distribuzione delle  $k$  che rispetta l'ampio range di valori sperimentalmente noto;
- in questo caso la scarsa conoscenza della portata scambiata tra la falda e il suo ricettore, il fiume Chiascio, costituisce il punto di debolezza del modello; tuttavia l'approccio utilizzato basato sulla modellazione inversa di più situazioni di flusso differenti permette ridurre l'incertezza sul bilancio globale;
- si ritiene che il modello proposto sia uno strumento valido ai fini della previsione dell'evoluzione del campo dei potenziali.

heads. However, even having only a few known points in order to constrain the piezometry would allow a flow model to be calibrated that could provide exhaustive answers in the case of several different management or climatic scenarios. Such a model would allow more reliable and accurate predictions than the example described regarding the evolution of the residual flow rates of the watercourse in the presence of withdrawals from wells or of lack of recharge in periods of prolonged drought.

In the case of the Petriignano aquifer:

- the developed numerical model provides a coherent synthesis of all the available information as well as a satisfactory reproduction of the piezometric field with a distribution of  $K$  that respects the wide range of experimentally known values;
- in this case the relatively scant knowledge of the flow rate exchanged between the aquifer and the receiving body, the Chiascio river, represents the weak point of the model; however, the approach adopted, based on the inverse modeling of different piezometric situations, allows the uncertainty concerning the global balance to be reduced;
- the proposed model is deemed to be a valid tool for predicting the evolution of hydraulic heads.

## OPERE CITATE/REFERENCES

- BARCHI M. & LEMMI M. (1996) - *Geologia dell'area del M. Coscerno-M. di Civitella (Umbria sud-orientale)*. Boll.Soc.Geol.It., **115**: 609-624.
- BOILA P., MARCHETTI G., & MARTINELLI A. (1993) - *L'acquifero del campo pozzi di Petriignano di Assisi: sviluppi degli studi idrogeologici e idrochimici*. In: Atti del 2° convegno internazionale di idrogeno-idrologia - La cooperazione nella ricerca con i Paesi in via di Sviluppo e quelli dell'Est Europa, Pitagora, Bologna.
- BONI C., MASTRORILLO L. & PREZIOSI E. (1994) - *Simulazione numerica di acquiferi carbonatici: l'esempio della struttura M.Maggio-M.Penna (Nocera Umbra)*. Geologica Romana, **30**: 27-36, Roma.
- BONI C. & PETITTA M. (1991) - *Il programma Newsam nella modellistica degli acquiferi carbonatici dell'Appennino centrale*. Atti 1° Conv. Naz. Giov. Ric. Geol. Appl., Gargnano (Bs), ott.1991 - Riv. Ric. Scien. Educ. Perm., suppl.n° 93, Milano, 237-246.
- BONI C. & PREZIOSI E. (1993) - *Una possibile simulazione numerica dell'acquifero basale di Monte Coscerno-Monte Aspra (bacino del fiume Nera)*. Geologia Applicata e Idrogeologia, **28**: 131-140, Bari.
- CELICO P. (1986) - *Prospezioni idrogeologiche*. Liguori Editore, 735 pp., Napoli, ISBN 88-207-1331-4.
- CESAP S.p.A. (1991) - *Progetto generale di salvaguardia delle risorse idriche della zona di Petriignano - Studio delle interazioni tra falda idrica e fiume Chiascio, Final Report*.
- CHENG J.M. & CHEN C.X. (2005) - An integrated linear/non-linear flow model for the conduit-fissure-pore media in the karst triple void aquifer system. Environmental Geology, **47**: 163-174.
- CHIODINI G., DEL GIUDICE C., GIAQUINTO S., MARCHETTI G., MARTINELLI A. & MARTINI E. (1991) - *Il monitoraggio idrogeologico ed idrochimico del sistema alluvionale della Valle Umbra*. In: Le acque sotterranee in Umbria, Protagon, Perugia.
- EISENLOHR L., KIRALY L., BOUZELBOUDJEN M. & ROSSIER Y. (1997) - *Numerical simulation as a tool for checking the interpretation of karst spring hydrographs*. J Hydrol. **193**: 306-315.
- GUO X. & ZHANG C.M. (2000) - *Hydraulic gradient comparison method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions*. Ground Water, **38** (6), 815-826.
- LEONARDI V., ARTHAUD F., GRILLOT J.C., AVETISSIAN V. & BOCHNAGHIAN P. (1996) - *Modélisation d'un aquifère basaltique fracturé tenant compte de données géologiques, climatiques et hydrauliques: cas des basaltes perchés de Garni (Arménie)*. J.Hydrol., **179**, pp.87-109.
- MARCHETTI G. & MARTINELLI A. (1991) - *Gli acquiferi alluvionali dell'Umbria*. In: Le acque sotterranee in Umbria, Protagon, Perugia.
- MARSILY G. DE, LEDOUX E., LEVASSOR A., POITRINAL D. & SALEM A. (1978) - *Modelling of large multilayered aquifer systems: theory and applications*. Journ. Hydrology, **36**, 1-34.
- MCDONALD M.G. & HARBAUGH A.W. (1988) - *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations Book 6, Chapter A1.
- PETITTA M. (1994) - *Modelli matematici di simulazione dell'acquifero carsico dei monti Lepini (Lazio meridionale)*. PhD thesis, Università di Roma "La Sapienza",

270 pp.

- PREZIOSI E. (2007) - *Simulazioni numeriche di acquiferi carbonatici in aree corrugate: applicazioni al sistema idrogeologico della Valnerina (Italia centrale)*. Università di Roma "La Sapienza", Tesi di Dottorato (1997), Quad.Ist.Ric.Sulle Acque, 125 (2007), 227 pp.
- PREZIOSI E., LEDOUX E. & BONI C. (1995) - *Evaluation par modèle mathématique de l'infiltration efficace dans un aquifère multicouche de l'Apennin central*. Atti del "2nd International Meeting of Young Researchers in Applied Geology (IMYRAG)": 367-375, Peveragno, Cuneo, 11-13 ottobre 1995.
- ROMANO E. & PREZIOSI E. (2007) - *Using inverse modelling to reduce uncertainty on the recharge to aquifers. The case of Petrignano d'Assisi (Italy)*. Proc. XXXV IAH Congress "Groundwater and Ecosystems Interdependencies", 227-228, Lisbon (Portugal), September 2007.
- ROMANO E., PREZIOSI E., MARTINELLI A. & GIULIANO G. (2006) - *A modelling approach to reduce the uncertainty on the global water balance of a phreatic aquifer using different piezometric head distributions*. Proc. "AQUAINMED 06 Conf.- Groundwater in Mediterranean countries", 671-677, Malaga (Spain), 24/04/2006-28/04/2006.
- SAUTER M. (1993) - *Double porosity models in karstified limestone aquifers: field validation and data provision*. Hydrogeological Processes in Karst Terrains. IAHS Publ., **207**: 261-279.
- TEUTSCH G. (1993) - *An extended double porosity concept as a practical modelling approach for a karstified terrain*. Hydrogeological Processes in Karst Terrains. IAHS Publ. **207**: 281-292.
- THORNTHWAITE C.W. (1948) - *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical Review, **38**: 55-94.

*Received September 2008 - Accepted January 2009*