

# Modellazione numerica per la gestione delle risorse idriche sotterranee nella Piana del Fucino (L'Aquila)

Nicolò Colombani<sup>1</sup>, Micol Mastrocicco<sup>1</sup>, Marilena Segato<sup>2</sup>

<sup>1</sup>L.A.R.A. (Laboratorio A Rete regionale sulle Acque), Università degli Studi di Ferrara

<sup>2</sup>Geologo, Libera Professionista, Piazzola sul Brenta (PD)

*Numerical modelling for groundwater management of Fucino Plain (L'Aquila, Italy)*

**ABSTRACT.** A regional flow model was implemented to quantify aquifer resources at a basin scale in the Fucino Plain (IT). Here, a continuous inflow occurs from karstic aquifers surrounding the plain toward sedimentary aquifers. Focus of this study is to individuate eventual disequilibrium and design a rationale monitoring network of water resources. A hydrogeological conceptual model has been developed with the aim of more than 200 core logs, average springs discharge, wells pumping rate, recharge rate and piezometric monitoring. During the calibration process the spatial variability of hydraulic conductivity of different hydrogeological units is been reconstructed; also, sensitivity analysis asses uncertainties linked to permeability values assigned and to boundary conditions. The accuracy level of model results is though to be of good quality as calibration was performed versus heads and fluxes (springs and canals) and the monitoring network is homogeneously distributed. Simulation results show a disequilibrium condition near Avezzano due to elevated pumping rate and low permeability of sediments; moreover, is been recognized a strong link between aquifer and drain network that not permit a water table rise above ground level.

*Key terms:* Aquifer, Modeling, Hydrogeology, Water budget, Management.

*Termini chiave:* Acquifero, Modellazione, Idrogeologia, Bilancio idrico, Gestione

## Riassunto

La modellazione a scala di bacino della Piana del Fucino si prefiggeva di quantificare gli apporti idrici dagli acquiferi carbonatici verso la Piana e la loro influenza sulla circolazione idrica sotterranea, al fine di individuare gli eventuali squilibri e progettare proposte di intervento. Per implementare la simulazione di flusso idrico sotterraneo all'interno dei sedimenti alluvionali che costituiscono la Piana, è stato redatto un modello idrogeologico concettuale che si avvaleva di una consistente letteratura con oltre 200 stratigrafie, di portate medie delle sorgenti e di pozzi, di numerose campagne piezometriche e dati termopluviometrici. Durante il processo di calibrazione si è ricostruita la variazione spaziale della conducibilità idraulica fra diverse unità idrogeologiche e tramite l'analisi di sensibilità è stata determinata l'incertezza legata ai valori di permeabilità assegnati alle singole unità ed alle condizioni al contorno. Il grado di accuratezza con cui il modello simula il sistema reale è da considerarsi buono grazie ai numerosi punti di controllo, sia di misure piezometriche che di portate registrate (sorgenti e canali).

I risultati della simulazione mostrano una situazione di squilibrio idrico nella zona di Avezzano, dovuto a prelievi ed alla bassa permeabilità dei sedimenti; inoltre è stata accertata la forte interazione fra l'acquifero e la rete di canali drenanti che impediscono l'impaludamento dell'area.

## Introduzione

La Piana del Fucino rappresenta un'area di valore ambientale, notevolmente delicata sotto il profilo degli equilibri che regolano i processi naturali degli ecosistemi, per cui nel 2006 l'Autorità di Bacino dei Fiumi Liri-Garigliano e Volturno ha affidato all'Associazione Temporanea di Imprese BETA Studio srl e HR Wallingford l'incarico relativo alla redazione del "Piana del Fucino - Regione Abruzzo. Programma di azioni strutturali e non strutturali connesse alla salvaguardia, uso e governo della risorsa idrica superficiale e sotterranea".

Lo studio, cofinanziato dalla Regione Abruzzo, si prefigge i seguenti obiettivi principali:

la conoscenza approfondita del sistema fisico-ambientale, insediativo e socio-economico del bacino del Fucino,

1. la valutazione dei possibili fenomeni di inquinamento e depauperamento della risorsa idrica superficiale e sotterranea, indotti dalle attività antropiche;
2. l'individuazione di interventi strutturali e non strutturali, finalizzati ad una maggiore tutela del "bene acqua" in termini sia qualitativi che quantitativi.

Per raggiungere gli obiettivi sopraccitati, lo studio, tuttora in corso, è stato organizzato in diverse fasi che comprendono la raccolta e l'elaborazione di dati di campagna e di letteratura, la definizione di un modello concettuale integrato dell'area, la progettazione di una rete

di monitoraggio ed infine la definizione di diverse ipotesi d'intervento che verranno verificate mediante la valutazione di diversi scenari di gestione con gli strumenti modellistici utilizzati per l'individuazione degli squilibri, l'analisi economica delle opzioni di intervento e l'analisi del quadro normativo ed istituzionale vigente (Fig. 1).

Nell'ambito dello studio sin qui esposto, il presente lavoro tratterà soltanto dell'elaborazione dei dati tramite simulazione numerica di flusso con il codice MODFLOW2000 (punti 3 e 6 in Fig. 1). Tale simulazione si prefiggeva di: (i) strutturare le informazioni a disposizione

in modo più organico eliminando i dati ridondanti, stimando i parametri non noti ed evidenziando le carenze di caratterizzazione al fine di migliorare la progettazione delle future campagne di indagine; (ii) individuare le zone all'interno della Piana del Fucino che potrebbero soffrire di un depauperamento permanente della risorsa idrica sotterranea se sovrasfruttate in periodi di particolare siccità (es: crisi idriche del 1999 e del 2001); (iii) definire il bilancio idrogeologico della Piana del Fucino per contribuire alla stesura del bilancio generale delle risorse idriche dell'area.

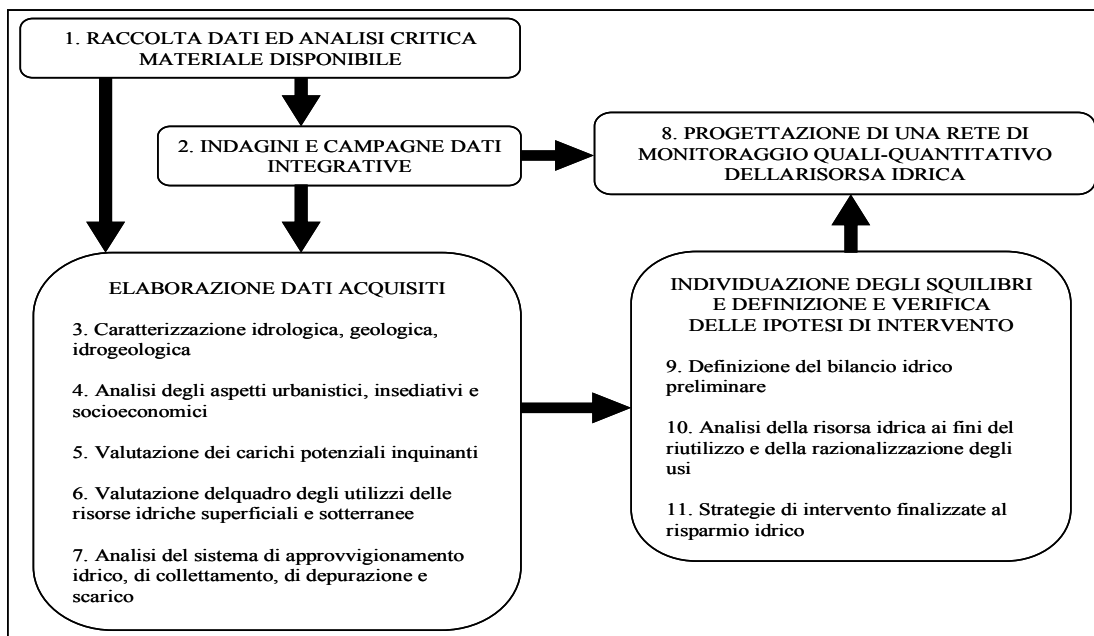


Fig. 1: Schema delle attività di indagine  
*Working packages chart*

## 1. Caratterizzazione dell'area di studio

I dati utilizzati per la redazione del modello concettuale e consistono in:

- base cartografica digitale 1:5.000 e DTM;
- caratteristiche plano-altimetriche dei canali di bonifica e delle opere idrauliche di regolazione;
- stratigrafie di 200 sondaggi;
- misure piezometriche;
- prove di portata in pozzi;
- dati pluviometrici e termometrici, misure di portata;
- portate dei pozzi in emungimento;
- portate delle sorgenti;
- dati sulle portate prelevate e restituite dalle reti di collettamento, distribuzione, depurazione e scarico.

Sulla base dei nuovi dati raccolti e degli studi esistenti è stato determinato il modello concettuale dell'area.

### 1.1 Il modello concettuale

La Piana del Fucino comprende l'area emersa in seguito allo svuotamento dell'omonimo lago, la cui bonifica è

stata realizzata in modo definitivo nel secolo scorso (Bosi et al., 1995; Celico e Celico, 1994; Burri, 1990). La medesima area è caratterizzata da un reticolo regolare di fossi che sfociano nel collettore principale il quale, presso l'Incile, imbocca una condotta sotterranea fino al fiume Liri (De Pratti, 1995; Petitta e Capelli, 1994; Giraudi, 1994) (Fig. 2).

I limiti del bacino alluvionale del Fucino sono rappresentati da massicci carbonatici sede di acquiferi ad alta produttività e caratterizzati da un'attiva circolazione idrica sotterranea che trova recapito nei fronti sorgentizi per soglia di permeabilità sovrapposta allineati appunto ai margini della Piana del Fucino (Celico, 1983; Giraudi, 1988).

Per tali sorgenti sono stati rilevati valori di portata che, vent'anni fa, andavano da 8,2 m<sup>3</sup>/s e 4,7 m<sup>3</sup>/s (Boni et al., 1986), ed ora variano tra 1,3 m<sup>3</sup>/s a 0,5 m<sup>3</sup>/s (Petitta et al., 2005). Il progressivo impoverimento delle sorgenti è con ogni probabilità da imputarsi all'incremento degli emungimenti sia per fini irrigui sia ad uso idropotabile che

captano le acque provenienti dai massicci carbonatici prospicienti la Piana (Burri e Petitta, 1998; Burri et al., 1997). Inoltre, al progressivo aumento dei prelievi nella Piana si è aggiunto un trend negativo delle precipitazioni ed un innalzamento delle temperature medie sui massicci carbonatici, con una conseguente minor ricarica (Burri e Petitta, 2002). Per questo motivo, gli enti locali (A.R.S.S.A. e Consorzio di Bonifica) che gestiscono la distribuzione della risorsa nella Piana, a partire dal 1989

hanno dato avvio agli attingimenti da pozzo al fine di mantenere il minimo deflusso vitale nei canali utilizzati per le attività agricole (Burri e Petitta, 1998). Lo spessore dei sedimenti alluvionali non consolidati che compongono la Piana del Fucino è di circa 400 metri al centro e decresce in prossimità dei versanti rocciosi (Cavinato et al., 2002; Galandini e Messina, 1993); il limite inferiore è dato dal complesso terrigeno flyscioide (Petitta et al., 2005).

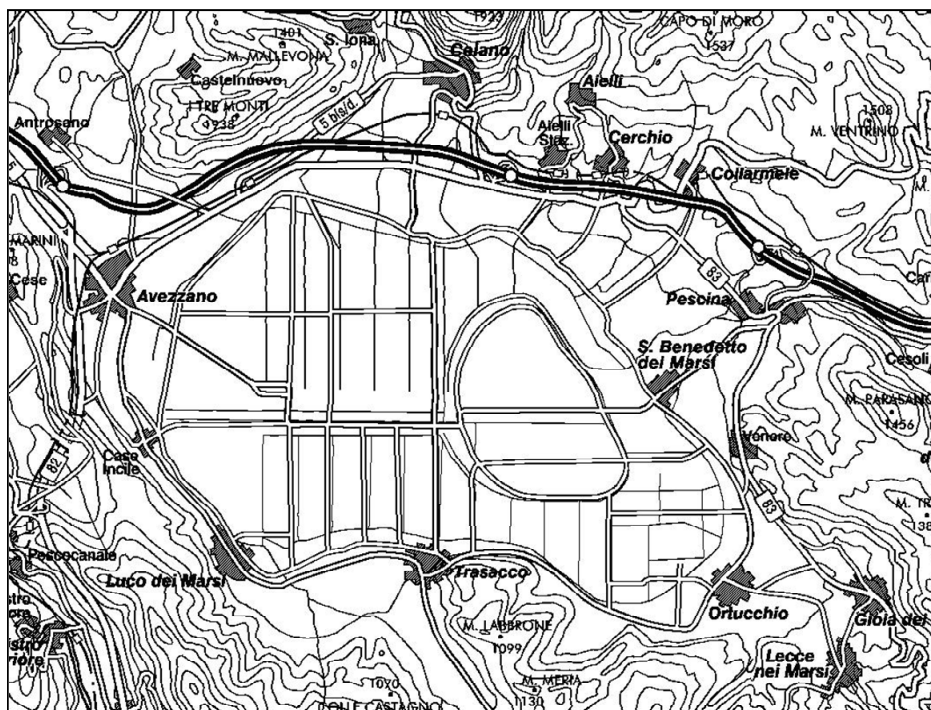


Fig. 2: Carta topografica 1:100000 della Piana del Fucino.  
*Topographic map 1:100000 of Fucino Plain.*

La Piana è costituita prevalentemente da una matrice limoso-sabbiosa (Zarlenga, 1987) che passa via via a termini francamente argillosi verso il centro ed a termini più grossolani verso il bordo (Bosi et al., 1995) dove, fra le propaggini dei massicci carbonatici e la Piana stessa, sono presenti numerose conoidi ghiaiose (Cardarelli et al., 2003). Ne consegue che in poche centinaia di metri vi possono essere variazioni orizzontali di permeabilità di parecchi ordini di grandezza, cosicché la struttura dei corpi alluvionali è molto complessa a piccola scala (con interdigitazioni e corpi lenticolari) mentre, alla scala del bacino, le unità idrogeologiche hanno forma pressoché tabulare (Petitta et al., 2005).

E' quindi ragionevole, se si ragiona a scala regionale, semplificare la realtà geologica del sistema unendo corpi a permeabilità simile. Grazie ai sondaggi ed alle tomografie elettriche effettuate in tutta la Piana, nelle conoidi adiacenti e nei massicci carbonatici, sono state individuate quattro unità idrostratigrafiche:

- la prima rappresenta la porzione di acquifero

carbonatico al limite con la Piana caratterizzata da calcari molto fratturati con conducibilità idraulica di  $3e^{-3}$  m/s e da calcari marnosi (presso Luco dei Marsi) con conducibilità idraulica orizzontale di  $5e^{-5}$  m/s

- la seconda è costituita da strette fasce rappresentanti le conoidi con valori di permeabilità che variano tra  $1e^{-3}$  m/s e  $2e^{-5}$  m/s ed un glaciais di erosione (presso Pescina) con permeabilità di  $2e^{-6}$  m/s
- la terza è la matrice dell'acquifero sede dei movimenti della falda (depositi sabbioso-limosi e sabbioso-ghiaiosi) con conducibilità idraulica compresa tra  $5e^{-4}$  m/s e  $1e^{-5}$  m/s
- la quarta è costituita da potenti pacchi di limo argilloso dovuti alla sedimentazione lacustre che costituiscono una barriera al deflusso delle acque sotterranee verso valle; tali depositi hanno una permeabilità media di  $1e^{-6}$  m/s

I valori sono coerenti con le reali caratteristiche granulometriche dei sedimenti costituenti le varie unità idrogeologiche e sono stati stimati tramite la formula di

Babouchkine-Guirinsky (Castany, 1963) per le falde libere e confinate:

$$K = Q \log(\alpha l / r) / 2.73 l \Delta h$$

Dove K è la conducibilità idraulica, Q è la portata del pozzo parzialmente penetrante l'acquifero,  $\alpha$  è un coefficiente pari a 0.66, l è la lunghezza del filtro, r è il raggio del pozzo e  $\Delta h$  è la depressione piezometrica all'equilibrio indotta dal pompaggio. Gli apporti idrici verso l'acquifero sono costituiti dai livelli delle falde basali nei carbonati e dall'apporto dovuto alla dispersione dal torrente Giovenco (Boni et al., 1986). I prelievi idrici tramite pozzi (dal bacino alluvionale e dagli acquiferi carbonatici) sono in prevalenza concentrati presso gli abitati così come le sorgenti (Celico, 1990). La rete di canali artificiali tracciati all'interno del bacino alluvionale del Fucino, mantiene il livello della falda costantemente al di sotto del piano campagna.

## 2. Modellazione numerica

Per implementare la simulazione di flusso di seguito illustrata, ci si è serviti del codice numerico MODFLOW 2000 (Harbaugh et al., 2000) che può simulare gli effetti di ricarica ed emungimento di pozzi e dreni, l'interazione con fiumi, laghi, torrenti e gli effetti dovuti alla ricarica ed alla evapotraspirazione. Si tratta di un codice di calcolo 3D a corpo centrato per la simulazione del flusso delle acque sotterranee sviluppato dall'U.S.G.S., che utilizza il metodo delle differenze finite (le variazioni di carico sono calcolate per nodi situati al centro delle celle mentre il flusso è calcolato sulle facce che mettono in contatto più celle adiacenti). Le principali assunzioni per l'applicabilità di tale codice sono che l'acquifero rispetti la legge di Darcy, sia omogeneo, isotropo ed abbia superficie piezometrica orizzontale, all'interno di ogni cella in cui viene discretizzato il dominio (Anderson et al., 1991). Per il caso

in esame è stata impiegata una simulazione a "regime stazionario" basata sulla teoria di deflusso in regime di equilibrio dove le variazioni si verificano unicamente nello spazio e non nel tempo (Spitz et al., 1996). La discretizzazione ha quindi riguardato soltanto lo spazio del dominio di simulazione e non il tempo.

### 2.1 Implementazione della simulazione di flusso

L'area interessata dalla simulazione è stata rappresentata mediante un dominio di dimensioni 20 km in direzione Nord-Sud e 30 km in direzione Est-Ovest ed è georeferenziata con base topografica CTR (Fig. 3). Si è scelto di non riprodurre l'intero spessore della Piana alluvionale ma di simulare solo i primi 200 m di sedimenti, poiché non si dispone di dati stratigrafici ed idrogeologici a profondità maggiori e anche perché i prelievi sono confinati nei primi 100-200 metri di acquifero. Il dominio è stato discretizzato in celle di estensione variabile: quelle maggiori misurano 200x200 m, quelle minori 100x100 m. Queste ultime sono state ottenute mediante un raffittimento della griglia in corrispondenza dei campi pozzi e delle sorgenti per una più dettagliata rappresentazione delle caratteristiche litologiche ed idrografiche.

Per poter rappresentare l'alternanza delle diverse unità idrogeologiche presenti nell'acquifero in esame sono stati utilizzati 3 layers di spessore variabile:

- il tetto del primo layer è costituito dalle quote topografiche desunte dal DTM e varia tra 554 e 1554 m s.l.m., la sua base si trova ad una quota mediamente inferiore di circa 70 m rispetto a quella topografica.
- il tetto del secondo layer coincide con la base del primo, mentre la sua base si trova a quote variabili tra 447 e 1487 m s.l.m.;
- il tetto del terzo layer coincide con la base del secondo, mentre la sua base si trova a quote variabili tra 411 e 1420 m s.l.m..

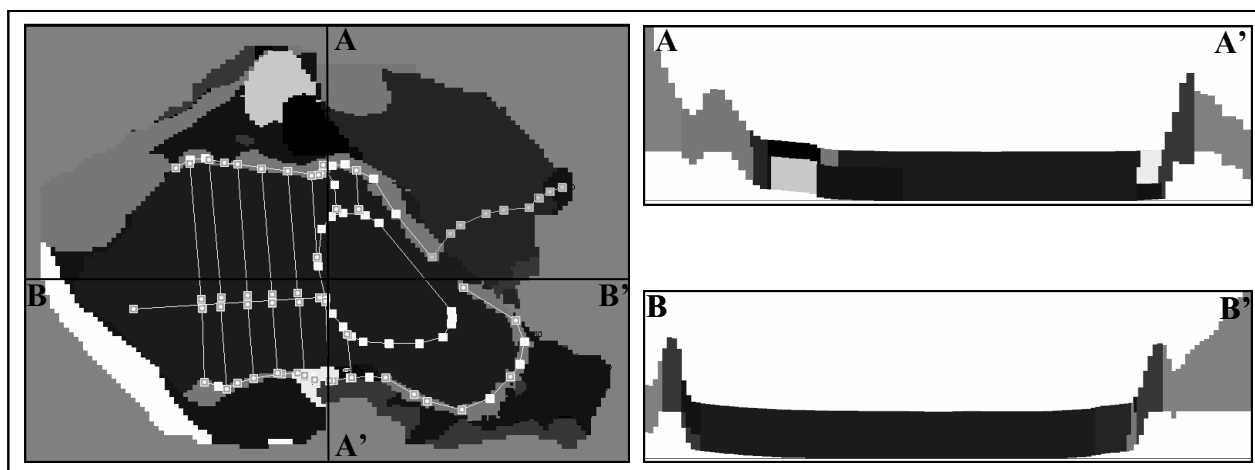


Fig.3 Dominio di flusso e distribuzione delle zone a diversa permeabilità ricostruite nel modello numerico, le linee bianche all'interno della Piana riproducono il sistema di canali superficiali.

*Model domain and distribution of different permeability zones, white lines delineate drain network of the plain.*

La distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale (Fig. 3) ricalca fedelmente quella individuata per le quattro unità idrostratigrafiche presenti nel dominio e descritte nel paragrafo precedente. La conducibilità verticale è 10 volte inferiore a quella orizzontale, poiché non avendo dati reali per definirla si è scelto di utilizzare questo valore tipico (Fetter, 2001) che assume che le sabbie e le ghiaie costituenti l'acquifero abbiano stratificazione pressoché orizzontale. Per verificare che tale scelta fosse plausibile, sono stati utilizzati anche valori identici alla permeabilità orizzontale e valori 5 volte inferiori ad essa; ciò non ha portato a variazioni apprezzabili rispetto ai valori piezometrici misurati.

I livelli piezometrici dei massicci carbonatici, estrapolati utilizzando i gradienti piezometrici tipici delle falde carbonatiche (Boni et al., 1986; Celico, 1983; Pace et al., 2005), sono stati utilizzati come condizione al contorno note e simulati tramite il modulo GENERAL HEAD BOUNDARY ai limiti del dominio di flusso. Con il modulo WELL è stata riprodotta la distribuzione dei pozzi e delle portate emunte pari a 31.7 milioni di m<sup>3</sup>/annui secondo i dati storici aggiornati al 2003 (Petitta et al., 2005).

Le sorgenti sono state simulate con il modulo DRAIN con conduttanza pari a 100 m<sup>2</sup>/s; tale valore tendente

all'infinito è stato appositamente scelto per assicurare che tutta l'acqua fluente nella cella "sorgente" venga estratta dal dominio di flusso. Sempre con il modulo DRAIN sono stati simulati i canali allaccianti ed i fossi scavati nei terreni limoso-argillosi della Piana del Fucino; ad essi è stata assegnata una conduttanza molto bassa, pari a  $C = 1e^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, calcolata utilizzando la portata di magra rappresentativa del deflusso di base (condizione in cui i fossi sono alimentati solamente dall'acquifero). Il torrente Giovenco è stato simulato tramite il modulo RIVER, dato che in alcuni tratti risultava drenante ed in altri alimentante rispetto alla falda (Woessner, 2000); i parametri immessi sono: il livello della base del torrente ricavato dal DTM, la lama d'acqua presente in alveo (1 m), il livello in alveo nel punto più a nord pari a 700 m s.l.m., nel punto più a sud paria 655 m s.l.m. ed una conduttanza media pari a  $2e^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

## 2.2. Risultati

Come menzionato nell'introduzione, le principali finalità del presente studio consistono nella riorganizzazione dei dati esistenti e nell'individuazione di aree sovrasfruttate che necessitano di interventi ed infine nell'elaborazione del bilancio idrogeologico della Piana del Fucino.

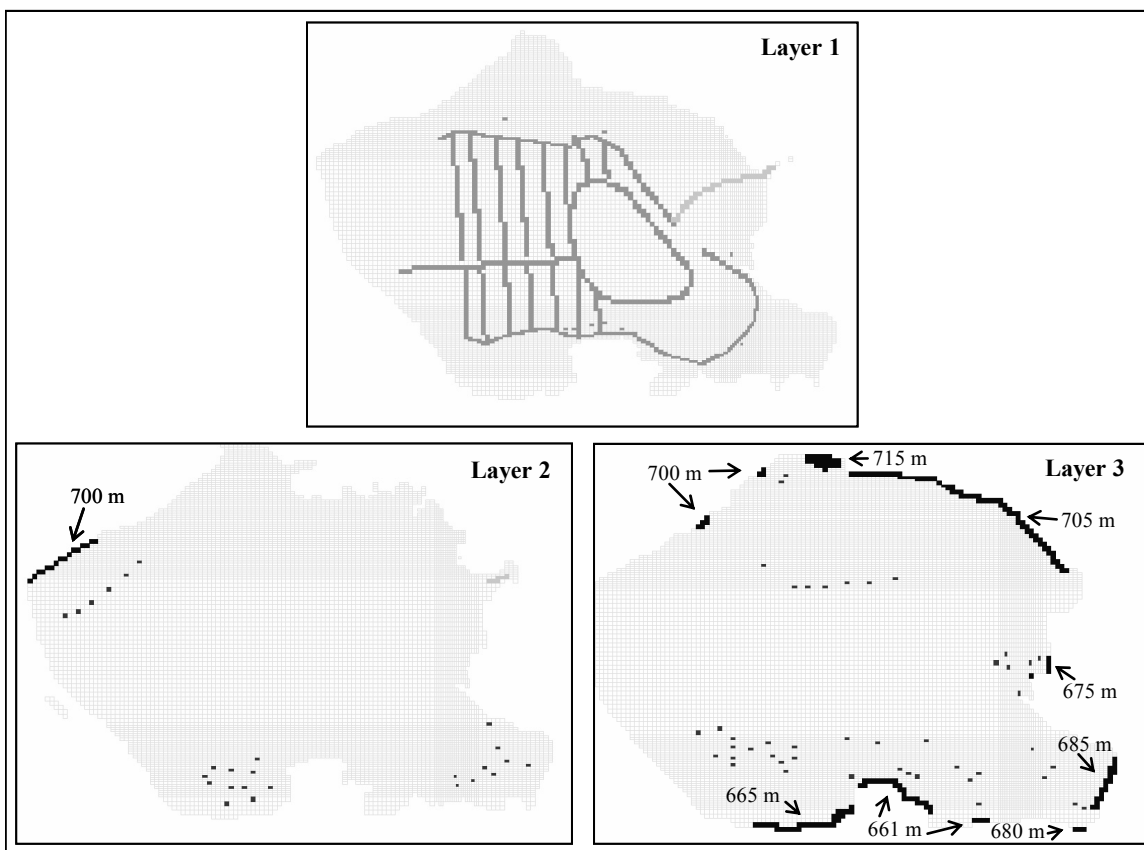


Fig. 4: Nell'immagine in alto sono rappresentati le celle DRAIN (grigio) e RIVER (grigio chiaro). Nelle immagini in basso si riconoscono i diversi General Head Boundary con i relativi valori piezometrici (nero) ed i pozzi in emungimento (grigio).

*DRAIN cells (gray) and RIVER cells (light gray) are represented in the upper figure. Lower figures show General Head Boundary with associated heads (black) and pumping wells (gray).*

La simulazione numerica in regime stazionario riferita all'anno 2003 (condizione media del livello dell'acquifero) ha permesso di quantificare gli apporti idrici dai diversi sottobacini carbonatici e di stimare quali aree siano più sensibili al sovrasfruttamento (Fig. 5).

In generale, il grado di caratterizzazione ai fini idrogeologici della Piana è da considerarsi buono grazie sia alla densità che alla qualità delle informazioni di cui si dispone; fa eccezione la zona del glacis di Pescina che ha evidenziato la necessità di un'ulteriore acquisizione di dati e dove quindi i primi risultati della simulazione appaiono meno attendibili.

Presso Avezzano i precedenti studi escludevano apporti dai massicci carbonatici verso la Piana, mentre tramite la

simulazione si è osservato che, pur agendo su altri input del modello (permeabilità, ricarica, etc.), è impossibile raggiungere un buon grado di calibrazione prescindendo da tali apporti, senza i quali la piezometria all'interno della Piana del Fucino non potrebbe in alcun modo raggiungere i 700 m s.l.m. misurati in diversi pozzi e piezometri presso Avezzano. La simulazione numerica ha confermato che gli ex canali di bonifica costituenti la rete irrigua della Piana del Fucino, hanno spesso comportamento drenante nei confronti dell'acquifero. Il torrente Giovenco invece è a tratti drenante ed a tratti alimentante nei confronti dell'acquifero e comunque la connessione tra questi due corpi è decisamente limitata ( $\pm 12$  l/s)

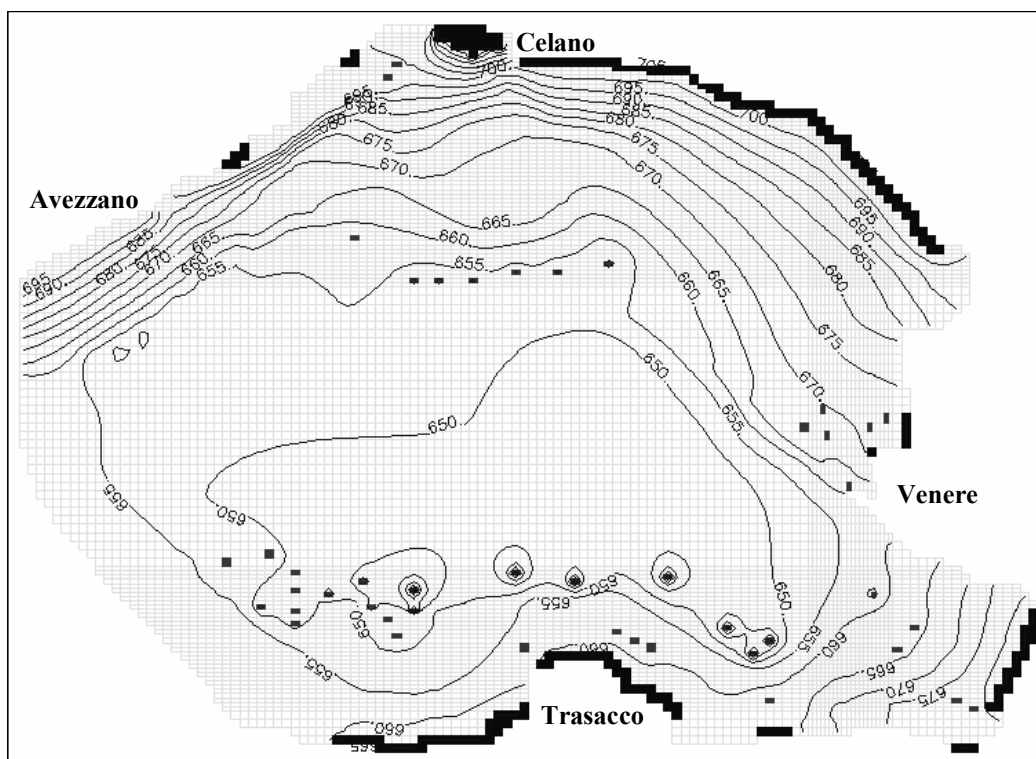


Fig. 5: Rappresentazione 2D del dominio di flusso, degli stress (pozzi, e GHB descritti in Fig. 4) e della piezometria calcolata. *Bidimensional representation of model domain, with stresses (wells and GHB described in Fig. 4) and calculated heads.*

La tavola d'acqua ha soggiacenza media di 5-6 m dal piano campagna; in media il gradiente idraulico è pari a 8 ‰ anche se nella porzione del dominio presso Avezzano raggiunge valori molto più elevati a causa della bassa permeabilità dei sedimenti ivi presenti e dei pompaggi per approvvigionamento idrico. Ciò è riconducibile ad una elevata densità di punti di approvvigionamento idrico privato nell'area comunale di Avezzano; si ritiene quindi che tale situazione debba essere in qualche modo regimata se si vogliono evitare fenomeni di sovrasfruttamento delle risorse, che a lungo termine potrebbero portare ad abbassamenti consistenti della falda idrica.

Mentre l'andamento generale delle direzioni di flusso è

convergente verso la Piana del Fucino, localmente esse vengono influenzate da diversi fattori tra cui: emungimenti, apporti dalle sorgenti, variazioni di conducibilità idraulica ed interazione con il complesso sistema di canali simulato (Fig. 4 - Layer 1). Ad esempio, in corrispondenza dei fronti sorgentizi s'instaurano assi di deflusso locali delle acque sotterranee che defluiscono dai massicci carbonatici verso il reticolo idrografico della Piana (es: zona di Trasacco).

Il bilancio idrogeologico, eseguito su tutto il dominio di flusso, mette in evidenza che la soluzione trovata soddisfa l'equazione di continuità del sistema poiché non vi sono differenze apprezzabili fra uscite ed entrate nel modello. In particolare (Fig. 6), gli afflussi verso il dominio sono

costituiti quasi esclusivamente dalla circolazione sotterranea proveniente dai massicci carbonatici ( $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) mentre i deflussi si suddividono in prelievi da pozzi ( $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ed in cessioni a corpi superficiali come canali e sorgenti ( $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tab. 1: Valori delle portate delle sorgenti simulate e misurate.  
*Calculated and observed values of springs discharge.*

Sorgente	Portate osservate	Portate calcolate	Differenza %
Paludi Celano	0.050	0.039	24,72
Aielli Stazione	0.100	0.103	-2,96
Trasacco Molino	0.350	0.369	-5,29
Trasacco Recinto	0.150	0.109	31,66
Trasacco St 36	0.100	0.116	-14,81
Trasacco Fosso 38 sx	0.060	0.057	5,13
Trasacco Fosso 38 dx	0.040	0.046	-13,95
Fosso 37	0.050	0.065	-26,09
Ortucchio	0.005	0.004	22,22
Restina Venere	0.330	0.336	-1,80
<b>Totale</b>	<b>1.235</b>	<b>1.244</b>	<b>-0,73</b>

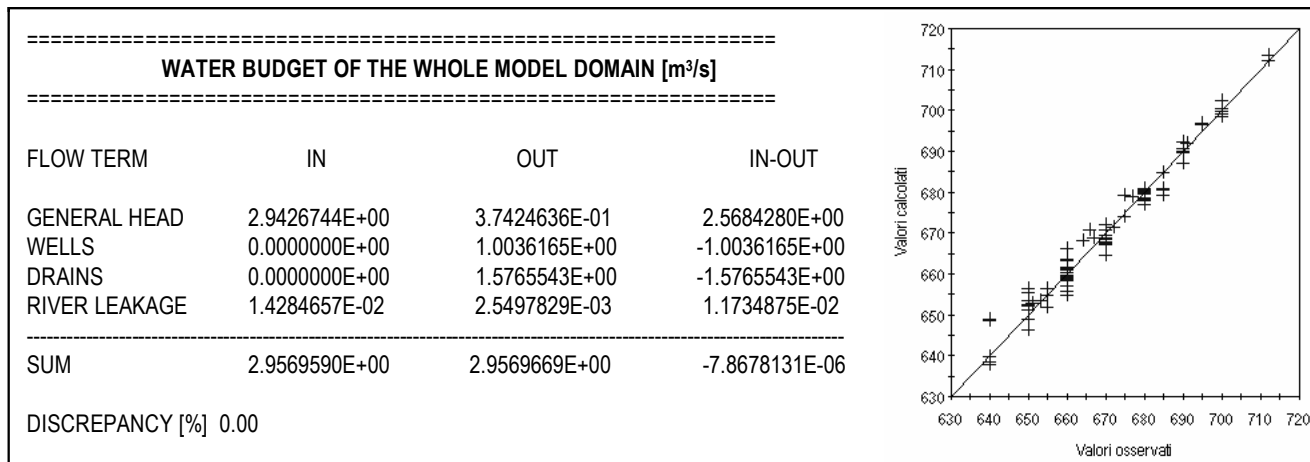


Fig. 6: Bilancio idrogeologico dell'intero dominio di flusso e diagramma di comparazione tra valori calcolati e valori osservati nei vari piezometri di controllo.

*Hydrogeological budget of whole model domain and scatter diagram of calculated and observed heads.*

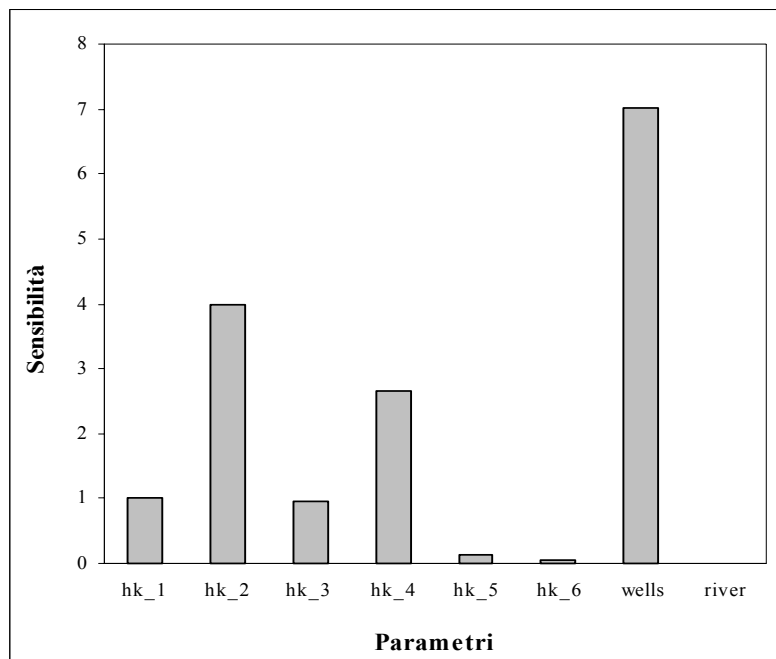
### 2.3 Analisi di sensibilità

Essendo il sistema considerato molto complesso dal punto di vista strutturale ed idrogeologico, con lenti che si interdigitano e repentine variazioni delle proprietà idrodinamiche dell'acquifero, il grado di rappresentatività della simulazione numerica è funzione della densità di punti di controllo presenti in ciascuna zona del dominio. Laddove i dati reali sono concentrati le proprietà assegnate al modello riproducono fedelmente quelle reali, mentre spostandosi in zone del dominio con caratterizzazione carente, i parametri di input risultano più sensibili (es: glaciai di Pescina). Per tale motivo si è deciso di sottoporre questi ultimi ad un'analisi di sensibilità (Anderson et al., 1991) così da poter valutare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

Ad ogni zona con differente conducibilità idraulica è stato assegnato un parametro identificativo e tramite il codice di modellazione inversa PEST (Doherty, 2002) sono

stati individuati i parametri più incerti, cioè quelli che al minimo variare del valore a loro associato presentano residuali più elevati (Hill, 1998; Hill et al., 2000). Nel nostro caso il parametro più incerto è la portata totale dei pozzi in emungimento (Fig. 7), per cui possiamo asserire che il modello risulta più sensibile alla variazione degli stress imposti piuttosto che alla variazione dei parametri idrodinamici del sistema (quali permeabilità e conduttanza).

Ad ogni modo il modello è piuttosto sensibile anche alle conducibilità idrauliche assegnate ai depositi limosi ed ai Calcari marnosi a causa della spinta eterogeneità di tali formazioni che mal si riesce a riprodurre con un valore medio di permeabilità. Il modello sembra essere poco sensibile al resto dei parametri analizzati, consentendo di formulare una soluzione efficace in grado di rappresentare fedelmente la circolazione idrica sotterranea.



Parametro		Valore di input
hk_1	Conoidi	1.0E-03 (m/s)
hk_2	Depositi limosi	1.0E-06 (m/s)
hk_3	Glacis	2.0E-06 (m/s)
hk_4	Calcari marnosi	5.0E-05 (m/s)
hk_5	Depositi sabbiosi	5.0E-04 (m/s)
hk_6	Calcari fratturati	3.0E-03 (m/s)
river	Torrente Giovenco	2.0E-05 (m <sup>2</sup> /s)
wells	(vedi Tab. 1)	1.17 (m <sup>3</sup> /s)

Fig. 7: Grafico delle Sensibilità rispetto ai valori piezometrici misurati e scheda dei parametri di input considerati.  
*Sensitivity graph of selected model parameters and table of parameters used.*

### 3. Considerazioni conclusive

In generale, va rimarcato il buon grado di attendibilità delle soluzioni ottenute; dovuto sia all'abbondanza dei dati di input che sono stati utilizzati per la modellazione, sia alla qualità dei dati stessi che hanno permesso una buona riproduzione delle caratteristiche geometriche e fisiche del dominio considerato. Inoltre, grazie alle misure di portata delle sorgenti, lungo i torrenti ed il sistema di drenaggio artificiale, è stato possibile riprodurre in dettaglio anche le interazioni fra corpi d'acqua superficiali e l'acquifero. Questo ha permesso di ottenere una più fedele riproduzione del sistema idrico sotterraneo rispetto alla sola calibrazione con dati piezometrici. L'analisi di sensibilità ha inoltre confermato che sono state correttamente impostate le zone a permeabilità omogenea, corrispondenti alle diverse unità idrogeologiche, per questo la simulazione approssima attendibilmente il sistema reale.

I risultati della simulazione mettono in luce una situazione di squilibrio idrico nella zona di Avezzano, dovuto ai numerosi prelievi ed alla bassa permeabilità delle formazioni presenti, che non permette un'intensificazione degli emungimenti a meno di importanti abbassamenti del livello medio di falda; inoltre è stata accertata la forte interazione fra l'acquifero e la rete di canali drenanti che mantengono costantemente la falda al di sotto del piano campagna.

Infine si ricorda che, per la simulazione qui in oggetto non ci si prefiggeva di riprodurre fedelmente le direzioni di flusso dell'acquifero presente nella Piana del Fucino bensì di caratterizzarne gli afflussi ed i deflussi. In questa fase

quindi il fine principale della modellazione numerica è stato quello di contribuire alla redazione del bilancio idrogeologico dell'area; solo in un secondo momento si prevede di poter utilizzare la simulazione numerica per un'analisi dettagliata della distribuzione spazio-temporale dei gradienti piezometrici. Per far ciò si dovranno implementare simulazioni in regime transitorio sostenute dalla raccolta di nuovi dati in continuo. Successivamente, se si vorrà valutare la vulnerabilità dell'acquifero utilizzando modelli di trasporto (MT3D, RT3D, UTCHEM, etc...) si dovranno riconsiderare le assunzioni iniziali ed affinare il modello concettuale secondo i casi specifici. Infatti, mentre la definizione di aree molto vaste a conducibilità idraulica costante può essere un'assunzione accettabile per un modello di flusso, difficilmente può risultare realistica per la modellazione di trasporto, che necessita di informazioni puntuali e dettagliate sull'assetto idrogeologico del dominio. Quindi, questo modello regionale può essere la base di partenza per eventuali Telescopic Mesh Refinement in porzioni del dominio con sufficienti dati idrogeologici ed idrochimici, indispensabili per calibrare eventuali modelli di trasporto.

### Ringraziamenti

Si ringraziano il Prof. Marco Petitta dell'Università La Sapienza di Roma per l'attenta revisione del modello concettuale su cui si è basata la simulazione numerica e l'Ing. Enrico Frank di BETA Studio s.r.l. per aver indirizzato lo studio sin dall'inizio.

Si ringraziano inoltre gli enti coinvolti nell'intesa di



programma che hanno messo a disposizione i loro archivi:

- Autorità di Bacino dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno,
- Regione Abruzzo,
- Provincia dell'Aquila,
- A.R.S.S.A.,

- Consorzio di Bonifica del Fucino,
- Comunità montane "Marsica 1" e "Valle del Giovenco",
- Consorzio Nucleo Industriale di Avezzano,
- Consorzio Acquedottistico Morsicano

## Bibliografia

- Anderson, M. P. and Woessner, W. W., 1991. Applied groundwater modelling: simulation of flow and advective transport - Academic Press.
- Boni, C., Bono, P., Capelli, G., 1986. Schema Idrogeologico dell'Italia Centrale. *Memorie Soc. Geol. Italiana* 36, 991-1012.
- Bosi, C., Galadini, F., Messina, P., 1995. Stratigrafia plio-pleistocenica della conca del Fucino. *Il Quaternario* 8, 83-94.
- Burri, E., Petitta, M., 2002. Groundwater monitoring as a management tool for irrigation in the Fucino Plain (Abruzzo, Central Italy). *Proceedings Conference Future Groundwater at Risk*, Lisbon, June 2001, 425-432.
- Burri, E., Petitta, M., 1998. Groundwater lowering in karstic aquifers due to agricultural activity in the Fucino Plain (Abruzzo, Central Italy). *Acta Carsologica XXVII/1 Ljubljana*, 2 27-45.
- Burri, E., 1990. Storia di un lago. *Il Fucino in Abruzzo*, Patron Bologna Terra 3/10, 42-52.
- Burri, E., Massoli-Novelli, R., Petitta, M., 1997. Vulnerability of karstic aquifers in Abruzzi (Italy). Two different case-studies: Gran Sasso mountain and Fucino Plain. 6th Conference on Limestone Hydrology and fissured aquifers (12th Int. Cong. Speleology) August 1997, La Chaux-de-Fonds (Neuchatel, CH) 2, 201-204
- Cavinato, G. P., Carusi, C., Dall'Asta, M., Miccadei, E., Piacentini, T., 2002. Sedimentary and tectonic evolution of Plio-Pleistocene alluvial and lacustrine deposits of Fucino Basin (Central Italy). *Sedimentary Geology* 148, 29-59.
- Cardarelli, E., Di Filippo, G., Floris, M., Martino, S., Scarascia Mugnozza, G., 2003. Stability of slope debris at the margins of intramontane basins: the Fonte Grande landslide (Celano, AQ). *Quaderni di Geol. Appl., Serie AIGA* 2 (1), 1-21.
- Castany, G., 1963. *Tratt'e pratique des eaux souterraines*. Dunod Ed. Paris.
- Celico, F., Celico, P., 1994. Aspetti idrogeologici del Bacino del Fucino. In (E. Burri Ed.): *Il Lago del Fucino ed il suo emissario*. Pescara, 35-45.
- Celico, P., 1983. Studio idrogeologico della conca del Fucino. *Relazione tecnica per E.R.S.A. della Regione Abruzzo*.
- Celico, P., 1990. Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro meridionale: Progetti speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno. *Quaderni Cassa Mezzogiorno* 4 (2), 1-227.
- De Pratti, G.M., 1995. Indagine sulla risorsa idrica della Conca del Fucino. *Quad. Geol. Appl.* 1, 213-219.
- Doherty, J., 2002. PEST - Model-independent parameter estimation. *User's manual 5<sup>th</sup> Edition*, Watermark Computing, Brisbane, Australia.
- Fetter, C.W., 2001. *Applied Hydrogeology*, 4th Edition. Macmillan College, New York.
- Galadini, F., Messina, P., 1993. Pio-Quaternary tectonics of the Fucino basin and surrounding areas (central Italy). *Giornale di Geologia* 56 (2), 73-99.
- Giraudi, C., 1994. Origine ed evoluzione geologica recente del Bacino del Fucino. In (E. Burri Ed.): *Il Lago del Fucino ed il suo emissario*. Carsa Ed, Pescara, 14-34.
- Giraudi, C., 1988. Evoluzione geologica della Piana del Fucino (Abruzzo) negli ultimi 30,000 anni. *Il Quaternario* 1, 131-159.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., and Mc Donald, M. G., 2000. MODFLOW-2000, The U.S. G. S. modular ground-water model User guide to modularization concepts and the ground-water flow process, U. S. G. S., Openfile report 00-92.
- Hill, M. C., 1998. Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 98-4005.
- Hill, M. C., Banta, E. R., Harbaugh, A. W. and Anderman, E. R., 2000. MODFLOW-2000, The U.S.G.S. modular ground-water model - User guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes, U.S.G.S., Openfile report 00-184.
- Pace, B., Boncio, P., Brozzetti, F., Lavecchia, G., Visini, F., 2005. From regional seismic hazard to "scenario earthquakes" for seismic microzonation: a new methodological tool for the Celano project. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Petitta, M., Burri, E., Del Bon, A., Marchetti, A., 2005. Hydrogeological map of Fucino. Firenze, ARSSA - SELCA.
- Petitta, M., Capelli, G., 1994. Inquadramento ideologico del Bacino del Fucino. In (E. Burri Ed.): *Il Lago del Fucino ed il suo emissario*. Carsa Ed. Pescara, 46-61.
- Spitz, K. and Moreno, J., 1996. A practical guide to groundwater and solute transport modeling, 461 pp. John Wiley & Sons, New York.
- Woessner, W. W., 2000. Stream and fluvial plain groundwater interactions: Rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water* 38 (3), 423- 429.
- Zarlenga, F., 1987. I depositi continentali del bacino del Fucino (L'Aquila Italia Centrale). *Geol. Rom.* 26, 25- 61.