

INTERAZIONI TRA ACQUE SOTTERRANEE E FIUME MARTA (ITALIA CENTRALE) E PROBLEMATICHE CONNESSE CON LA DETERMINAZIONE DEL DEFLUSSO MINIMO VITALE

INTERACTIONS BETWEEN GROUNDWATER AND RIVER MARTA (CENTRAL ITALY) AND PROBLEMS RELATED TO THE DEFINITION OF THE INSTREAM FLOW

ANTONELLA BAIOCCHI(*), FRANCESCA LOTTI(*), VINCENZO PISCOPO(*) & ILARIA ROCCHETTI(*)

(*) Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile - Università degli Studi della Tuscia - Viterbo

RIASSUNTO

Il lavoro riguarda un'analisi delle interazioni tra le acque sotterranee e le acque superficiali dell'alto bacino del Fiume Marta (circa 578 km²), finalizzata a verificare le problematiche connesse con la determinazione del deflusso minimo vitale in alcune sezioni d'alveo significative.

Il Fiume Marta, emissario del Lago di Bolsena, presenta lungo l'asta principale cinque centrali idroelettriche e scarichi di alcuni centri urbani e piccoli impianti industriali. Le acque sotterranee del bacino vengono captate attraverso numerosi pozzi. L'area inoltre è caratterizzata dalla presenza di zone di interesse naturalistico ed ambientale.

Il lavoro ha compreso la raccolta dei dati di portata storica del Fiume Marta, l'esecuzione di nuove campagne di misura della portata fluviale, l'elaborazione dei dati meteorologici, il censimento dei pozzi e delle sorgenti.

È risultato che il deflusso del fiume è sostenuto, oltre che dagli efflussi del Lago di Bolsena e dal ruscellamento, dalle acque sotterranee, essendo il corso d'acqua il recapito preferenziale della falda di base dell'acquifero vulcanico. Da una prima valutazione del bilancio idrologico medio annuo, è risultato che complessivamente le risorse idriche del bacino sono di circa 200×10⁶ m³/anno, delle quali circa il 51% è rappresentato dalle acque di infiltrazione efficace, circa il 30% è rappresentato da acque di ruscellamento superficiale e circa il 19% è costituito da apporti idrici sotterranei esterni al bacino superficiale. Le uscite di acqua dal sistema hanno recapito principalmente nel fiume; rappresentano una reale perdita d'acqua dal sistema i prelievi idrici ad uso irriguo, stimati in circa il 20% delle risorse idriche.

La determinazione del deflusso minimo vitale, condotta con riferimento ad alcune sezioni d'alveo interessate da derivazioni, ha permesso di definire un intervallo di valori per la stessa sezione applicando più metodi basati sulla portata naturale del corso d'acqua. L'applicazione ha evidenziato che la determinazione del deflusso minimo vitale dovrebbe tener conto, non solo della dinamica dell'asta fluviale, ma anche dell'intero sistema idrogeologico al quale il fiume appartiene; in particolare, in casi in cui il fiume è alimentato da acque sotterranee bisogna considerare non solo i prelievi e le derivazioni dal fiume, ma anche i pompaggi dall'acquifero che sottraggono risorse al deflusso di base.

PAROLE CHIAVE: interazioni acque sotterranee - superficiali, bilancio idro-

ABSTRACT

An analysis of the interactions between surface and ground waters has been proposed for the upper basin of the River Marta (about 578 km²) in order to examine the problems related to the instream flow definition for some significant river sections.

The River Marta, outlet of the Lake Bolsena, presents along its master course five hydroelectric power stations and the waste of some towns and little industries. The groundwater resources have been extracted from several wells. In addition, the basin is characterized by some areas of environmental value.

The analysis included the collection of the streamflow records of the River Marta, new measurements of the streamflow, processing of the meteorological data and acquisition of the data concerning wells and springs.

It emerged that the streamflow is fed from groundwater, being the river the main discharge of the volcanic aquifer, as well as from the effluent of the Lake Bolsena and surface runoff. A first average annual evaluation of the water budget of the basin points to an amount of water resources of about 200×10⁶ m³/year, among which 51% is constituted by effective infiltration, 30% by surface runoff and 19% by groundwater inflow from outside the watershed. The flow leaving the system discharges mainly in the river. Actual water loss from the system is constituted by the withdrawals for irrigation (about 20% of the overall water resources).

The determination of the instream flow of the River Marta applied to some significant sections with different methods leads to various values. The experience showed that the evaluation of instream flow cannot be based only on the investigation of the watercourse. The whole hydrogeological system connected with the river must be considered too, particularly when the river is fed from groundwater. It is necessary to take into consideration not only the direct withdrawals from the river but also the pumping from the aquifer which impoverishes the river baseflow.

KEY WORDS: surface-ground waters relations, water budget, instream flow,

gico, deflusso minimo vitale, Fiume Marta, Lago di Bolsena

INTRODUZIONE

L'area comprendente l'alto corso del Fiume Marta, emissario del Lago di Bolsena, è caratterizzata dalla presenza di zone ad elevata naturalità, quali la Riserva Naturale di Tuscania ed il Sito di Interesse Comunitario del Fiume Marta, comprendente proprio la fascia perfluviale dell'alto corso (REGIONE LAZIO, 2003). Sullo stesso tratto fluviale insistono cinque centrali idroelettriche e gli scarichi delle acque reflue di diversi centri urbani e di alcuni piccoli impianti industriali, che condizionano la qualità delle acque superficiali, come evidenziato dalla eterogeneità dell'Indice Biotico Esteso mappato in precedenti campagne di biomonitoraggio (ANDREANI *et alii*, 1997). Proprio la presenza delle derivazioni idriche praticate dalle centrali idroelettriche ha sollevato la problematica della definizione del deflusso minimo vitale in risposta a quanto introdotto nell'ultimo decennio dalla normativa nazionale (Legge 183/1989, DD. LL. 275/1993 e 152/1999).

In funzione di questa necessità l'Autorità dei Bacini Regionali della Regione Lazio (REGIONE LAZIO, 1998; CALENDIA *et alii*, 2000) ha svolto uno studio su alcuni corsi d'acqua dei bacini regionali, determinando attraverso più metodi il deflusso minimo vitale anche per il Fiume Marta.

Il quadro legislativo italiano non fornisce indicazioni circa i metodi da utilizzare per il calcolo del deflusso minimo vitale, come dimostra la letteratura al riguardo che comprende diversi approcci al problema (per esempio, CROSA *et alii*, 1988; MARTINI *et alii*, 1994; SANTORO, 1994; UBERTINI *et alii*, 1995; SPAGGIARI *et alii*, 1997; CALENDIA *et alii*, 2000). Il problema dei rilasci minimi viene affrontato a volte con approcci di natura esclusivamente biologica o idrologica, a volte considerando entrambi i punti di vista in aggiunta anche ad analisi degli aspetti geomorfologici ed economici. La necessità dell'approccio multidisciplinare diviene sempre più imprescindibile nell'ottica di considerare tutti i fattori che incidono sull'ambiente fluviale in relazione ad un sistema di regolazione dei deflussi.

In questo contesto si inserisce l'obiettivo di questo studio, che riguarda l'analisi delle relazioni tra acque superficiali ed acque sotterranee nell'alto bacino del Fiume Marta e le relative implicazioni sulla determinazione del deflusso minimo del corso d'acqua, inquadrando il fiume nel più ampio contesto idrogeologico di riferimento. A tale scopo sono state utilizzate le conoscenze idrogeologiche riportate in letteratura (BONI *et alii*, 1986; CAPELLI *et alii*, 2005), sono stati considerati i risultati dei precedenti studi relativi alla determinazione del deflusso minimo vitale del fiume (REGIONE LAZIO, 1998; CALENDIA *et alii*, 2000) e sono state eseguite indagini di dettaglio nella porzione di bacino dove più evidenti sono gli impatti antropici sul sistema fluviale.

AREA DI STUDIO

La porzione di bacino esaminata (circa 578 km²) è compresa tra due stazioni di misura di portata dell'ex S.I.M.N. (Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, attualmente APAT) poste lungo il corso del

River Marta, Lake Bolsena.

INTRODUCTION

The upper course of the River Marta, outlet of Lake Bolsena, is characterized by some areas of environmental value, as the Tuscania Natural Reserve and the Special Area of Conservation (SAC) of the River Marta (REGIONE LAZIO, 2003) including just the upper part of the water course. Five hydroelectric power stations are located in this part of the river together with human and industrial wastes from several little towns, which modify the surface water quality, as highlighted by the heterogeneity of the Extended Biotic Index along the river course (ANDREANI *et alii*, 1997). The utilization of the river waters by the power stations gave rise to the problem of the determination of the minimum streamflow for fish life (instream flow) as defined in the Italian legislation (Italian Law 183/1989, Italian Legislative Decrees 275/1993 and 152/1999). Because of this the Autorità dei Bacini Regionali of Regione Lazio lead a study, dealing with some rivers of regional watersheds, determining the instream flow through different methods, including the River Marta (REGIONE LAZIO, 1998; CALENDIA *et alii*, 2000).

The Italian legislation does not give directions about methods for the instream flow to be calculated. Some elements are given in the literature (CROSA *et alii*, 1988; MARTINI *et alii*, 1994; SANTORO 1994; UBERTINI *et alii*, 1995; SPAGGIARI *et alii*, 1997; CALENDIA *et alii*, 2000).

Different approaches include biology, hydrology or both together with geomorphology and economics. Multidisciplinary is clearly essential if all the elements of the river environment related to the regulation of streamflow is to be considered.

In this context, the aim of this study is to analyse the relations between surface and ground waters in the upper portion of the River Marta watershed, with particular attention to the implication in the definition of the instream flow.

General former hydrogeological knowledge has been considered (BONI *et alii*, 1986; CAPELLI *et alii*, 2005), together with the results of instream flow studies in the area (REGIONE LAZIO, 1998; CALENDIA *et alii*, 2000) and detailed investigations have been conducted in the most urbanized areas.

STUDY AREA

The area of drainage basin investigated is outlined by two gauging stations of streamflow owned by the former S.I.M.N. (Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, now APAT) along the River

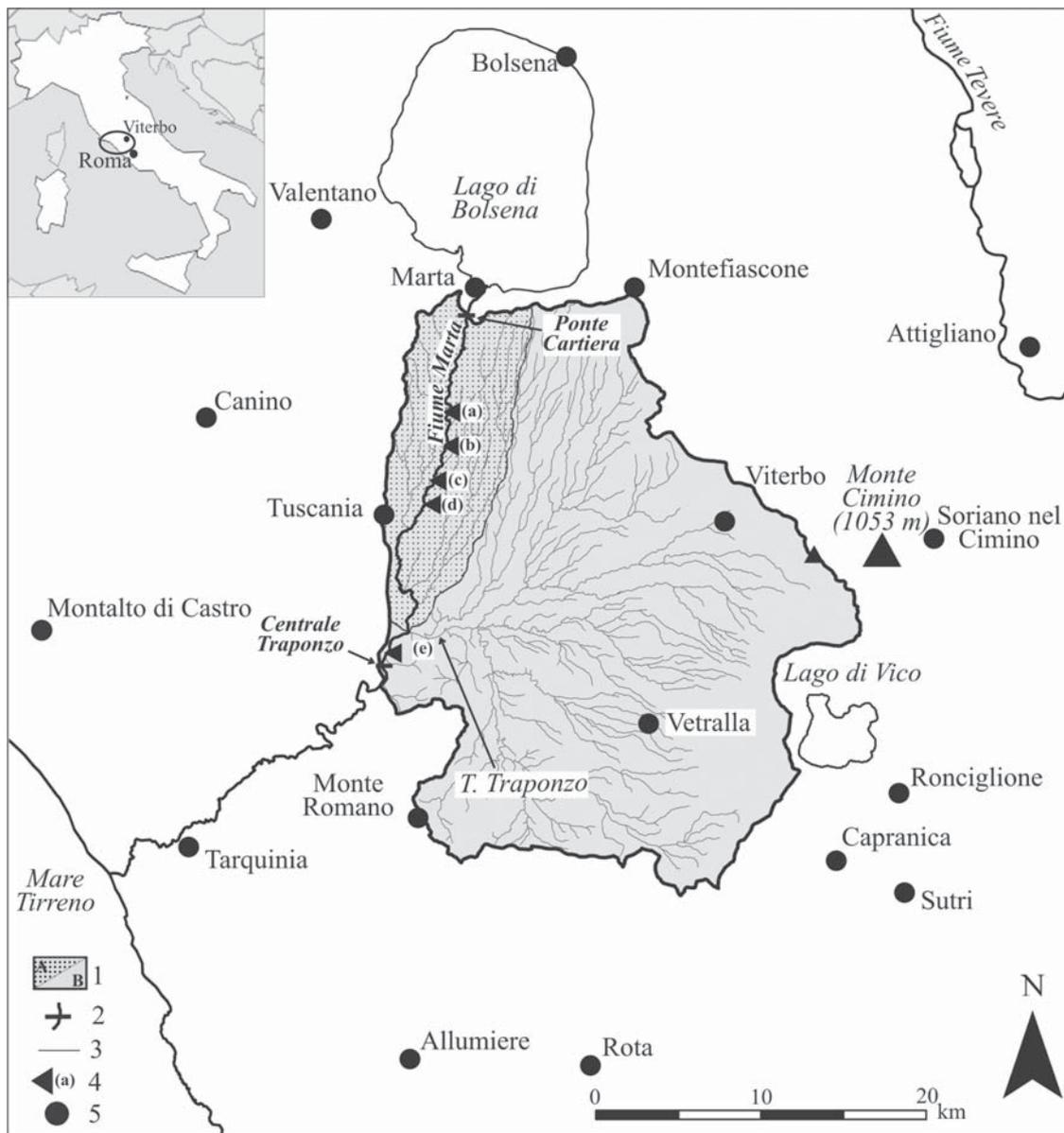


Fig. 1 - Area di studio. 1 - Bacino di studio (A: sottobacino del Fiume Marta; B: sottobacino del Torrente Traponzo); 2 - Stazioni idrometrografiche; 3 - Centrali idroelettriche (a: S. Savino I; b: S. Savino II; c: S. Savino III; d: Fioritella; e: Centrale Traponzo); 4 - Stazioni meteorologiche
 - Location of the study area. 1 - Drainage basin (A: sub-basin of the River Marta; B: sub-basin of the Stream Traponzo); 2 - Gauging stations of stream-flow; 3 - Hydroelectric power stations (a: S. Savino I; b: S. Savino II; c: S. Savino III; d: Fioritella; e: Centrale Traponzo); 4 - Meteorological stations

Fiume Marta (Fig. 1). La prima stazione (Ponte Cartiera) è ubicata a circa 2 km dal Lago di Bolsena, la seconda (Centrale Traponzo) è posta a circa 9 km a sud dell'abitato di Tuscania. Con tale definizione del bacino idrografico si hanno significativi elementi per valutare il bilancio idrologico, essendo disponibili misure dei deflussi.

Il tratto di fiume interessato dallo studio è quello caratterizzato dalla maggiore antropizzazione e uso del suolo più intenso. Lungo l'asta principale sono presenti piccoli impianti industriali e gli abitati di Marta e Tuscania, con i relativi impianti di depurazione; alcuni

Marta (Fig.1). The first one (Ponte Cartiera station) is located at 2 km from Lake Bolsena, the second one (Centrale Traponzo station) is at about 9 km southward Tuscania Town. With this delimitation of the drainage basin boundaries and with the flow measurements available it is possible to evaluate the water budget.

The branch of river considered is characterized by the higher urbanization and the most intensive land use. The towns of Marta and Tuscania, with their wastewater treatment plants, and some small factories are placed right along the main stream, while other tributary

affluenti del Fiume Marta raccolgono inoltre le acque di depurazione di Viterbo e Vetralla. Nello stesso tratto fluviale, la presenza di cinque centrali idroelettriche riduce notevolmente il deflusso in alveo.

Il bacino considerato ha una forma piuttosto allungata che si allarga più a valle in sinistra orografica. Qui il Marta riceve il suo principale tributario, il Torrente Traponzo, il cui bacino si estende dalle pendici orientali dell'apparato vulcanico vulsino fino a quelle settentrionali dei Monti Cimini (Fig. 1).

La geologia dell'area di studio è da ricondurre principalmente all'attività di tre differenti complessi vulcanici pleistocenici, quello vulsino, quello cimino e quello vicano. Pertanto nel bacino affiorano principalmente rocce vulcaniche e vulcanoclastiche pleistoceniche, differenziate per chimismo ed età. I prodotti più diffusi in affioramento e nel sottosuolo comprendono: colate laviche vulsine, successioni di prodotti piroclastici incoerenti e stratificati vulsini e vicani, espansioni ignimbricitiche dei tre complessi vulcanici, con di scorie e lapilli vulsini e colate laviche vicane (LOCARDI, 1965; BORGHETTI *et alii*, 1981; SOLLEVANTI, 1983; BERTAGNINI & SBRANA, 1986; LARDINI & NAPPI, 1987; DE RITA, 1993; NAPPI *et alii*, 1995; NAPPI *et alii*, 1998).

Il substrato delle vulcaniti è costituito da unità argilloso-sabbiose-conglomeratiche plio-pleistoceniche, affioranti lungo il basso corso del Fiume Marta, e dal flysch argilloso-calcareo-arenaceo cretaceo-miocenico, presente al margine meridionale del bacino e, soprattutto, in sinistra orografica del Torrente Traponzo e dello stesso Fiume Marta (FAZZINI *et alii*, 1972; BALDI *et alii*, 1974; AMBROSETTI *et alii*, 1978; BUONASORTE *et alii*, 1987; CHIOCCHINI & MADONNA, 2003).

In Tabella 1 sono riportati i principali elementi morfometrici del bacino, comprendenti l'area di drenaggio, l'altezza media, la pendenza media del corso d'acqua principale e del bacino, il fattore di forma e la densità di drenaggio, ricavati dall'esame della cartografia alla scala 1: 25,000. Gli anzidetti parametri sono stati calcolati per l'intero bacino oggetto di studio e, considerate le differenze morfologiche tra l'area di drenaggio del Fiume Marta e del Torrente Traponzo, anche per questi ultimi due sottobacini (Fig. 1).

ies collect the treated wastewater of Viterbo and Vetralla. In the same branch of river the streamflow is lowered by five hydroelectric power stations.

The drainage basin considered has an elongated shape from the lake to Tuscania; downward it enlarges on the left, where the main tributary, Stream Traponzo, flows. Its basin spreads from the east foot of the Vulsini volcanic complex to the north of the Cimino Mountains (Fig. 1).

The geological outline of the area is linked to the activity of three Pleistocene volcanic complexes: Vulsini, Cimini and Vico volcanoes. The outcropping rocks include mainly volcanic and vulcanoclastic formations, different in age and chemical composition. The most widespread products are: Vulsini lava flows, sequences of unconsolidated and stratified Vulsini and Vico pyroclastics, ignimbritic formations of the three complexes, Vulsini scoria cones and lapilli, and Vico lava flows (LOCARDI, 1965; BORGHETTI, 1981; SOLLEVANTI, 1983; BERTAGNINI & SBRANA, 1986; LARDINI & NAPPI, 1987; DE RITA, 1993; NAPPI *et alii*, 1995; NAPPI *et alii*, 1998).

The basement of the volcanics is constituted by Plio-Pleistocene clayey-sandy-conglomeratic deposits, outcropping along the lower course of the River Marta, and Cretaceous-Miocene clayey-calcareous-sandy flysch, outcropping along the south boundary of the basin and, especially, on the left of Stream Traponzo and River Marta as well (FAZZINI *et alii*, 1972; BALDI *et alii*, 1974; AMBROSETTI *et alii*, 1978; BUONASORTE *et alii*, 1987; CHIOCCHINI & MADONNA, 2003).

Table 1 shows up the main morphometric elements of the basin, such as the drainage area, the average elevation, the average slope of the river and land slope of the basin, the shape factor and drainage density, derived from the topographic maps 1:25,000. These parameters have been calculated both for the whole basin and for the two sub-basins Marta and Traponzo (Fig. 1).

Elementi morfometrici Morphometric parameters	Area di studio Whole basin	Sottobacino Marta Sub-basin R. Marta	Sottobacino Traponzo Sub-basin S. Traponzo
Area di drenaggio (km ²) Drainage area (km ²)	577.6	94.1	483.5
Altezza media del bacino (m s.l.m.) Average elevation of the basin (m asl)	260	230	265
Pendenza media del corso principale (%) Average slope of the river (%)	0.9	1.0	3.8
Pendenza media del bacino (%) Average slope of the basin (%)	5.2	4.8	4.9
Fattore di forma Shape factor	1.0	2.1	0.2
Densità di drenaggio (km ⁻¹) Drainage density (km ⁻¹)	2.3	2.0	2.4

Tab. 1 - Principali elementi morfometrici dell'area di studio e dei sottobacini del Fiume Marta e del Torrente Traponzo
- Main morphometric elements of the drainage basin and of the sub-basins of the River Marta and Stream Traponzo

RACCOLTA ED ELABORAZIONE DEI DATI

Allo scopo di definire lo schema idrogeologico dell'area, effettuare una stima del bilancio idrologico e del deflusso minimo vitale, sono stati acquisiti ed elaborati i dati disponibili e sono state condotte nuove misure ed indagini.

I dati dei pozzi, necessari per la ricostruzione della superficie piezometrica, sono stati reperiti principalmente presso l'A.P.A.T. (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici) e da studi inediti relativi al territorio in esame (BAIOCCHI, 2001; ROCCHETTI, 2005). I dati considerati riguardano circa 800 pozzi, distribuiti all'interno e nell'intorno dell'area di studio, e comprendono la stratigrafia, misure piezometriche ed, in qualche caso, prove di pompaggio. Di questi pozzi 514 (Fig. 5), aventi profondità variabile da alcuni metri a qualche centinaio di metri e portata emunta da 0.5 l/s fino ad un massimo di qualche decina di l/s, sono stati utilizzati per la ricostruzione piezometrica. Le misure dei livelli idrici di questi ultimi si riferiscono al periodo 1987-2004.

Le sorgenti sono state censite facendo riferimento essenzialmente a studi precedenti (BAIOCCHI, 2001; ROCCHETTI, 2005) ed elaborati tecnici disponibili presso strutture pubbliche, quali l'A.T.O. 1 (Ambito Territoriale Ottimale) della Regione Lazio e il S.I.R.A. (Servizi Informativi Regionali Ambientali) della Regione Lazio. Sono state considerate 29 sorgenti, aventi una portata compresa generalmente da qualche litro al secondo fino ad un massimo di circa 30 l/s.

Presso l'ex S.I.M.N. sono stati reperiti i dati di precipitazione e temperatura del periodo 1950-2000 relativi alle stazioni meteorologiche presenti nell'area di indagine e nel suo intorno (Fig. 1). I dati mancanti delle serie storiche sono stati ricostruiti tramite regressione tra le stazioni scelte in relazione alla loro quota e ubicazione.

Utilizzando i dati puntuali di pioggia media è stata elaborata la carta delle isoiete medie annue, attraverso l'interpolatore lineare *kriging*. Dai dati pluviometrici e termometrici, applicando la relazione di Turc (TURC, 1954), è stata calcolata l'evapotraspirazione reale media annua di ogni stazione e successivamente elaborata la carta a curve isoevapotraspire medie annue dell'area. Quest'ultimo metodo è stato scelto a causa della mancanza di dati di base più specifici, utili per l'applicazione di procedure fisicamente basate (quale, per esempio, quella di PENMAN, 1948). Tuttavia, in alcune aree dell'Italia centrale (DE FELICE & DRAGONI, 1981; BONO, 1993) è stato dimostrato che il metodo di Turc fornisce risultati sufficientemente approssimati.

Lo studio dei deflussi del Fiume Marta è stato condotto innanzitutto facendo riferimento ai dati idrometrografici presenti presso l'ex S.I.M.N. riguardanti le due stazioni che definiscono il bacino oggetto di studio. I dati disponibili riguardano misure della portata giornaliera relative ai periodi 1948-1985 per la stazione di Ponte Cartiera e 1936-1972 per la stazione di Centrale Traponzo, con alcune lacune. Anche se queste due serie si riferiscono a periodi diversi con un intervallo di sovrapposizione di 24 anni, esse sono state ritenute rappresentative dei deflussi medi delle due stazioni di misura in quanto coprono un periodo superiore a 30 anni di osservazioni. Questa ipo-

ACQUISITION AND INTERPRETATION OF DATA

Our hydrogeological investigations included the acquisition and re-interpretation of all available data relating to the area in question, as well as new measurements and surveys with the purpose of defining the hydrogeological layout, the water budget and the instream flow.

The data concerning the wells were obtained from A.P.A.T. (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici) and unpublished studies (BAIOCCHI, 2001; ROCCHETTI, 2005). Information was obtained on some 800 wells, situated both inside and outside the study area, enabling detailed listings of technical drilling data, local stratigraphy, groundwater levels and, in some cases, pumping tests. Using the piezometric data measured and acquired from a total of 514 wells (cf. Fig. 5), varying in depth from a few metres to several hundred meters, with yield comprised between 0.5 and a few tens of litres per second, it was possible to reconstruct the aquifer's overall potentiometric surface. Data referred to the period between 1987 and 2004.

Information on springs was obtained from former studies (BAIOCCHI, 2001; ROCCHETTI, 2005) and technical reports of public authorities (A.T.O. 1 -Ambito Territoriale Ottimale della Regione Lazio and S.I.R.A. - Servizi Informativi Regionali Ambientali). Twenty-nine springs have been examined, with discharge rate comprised between a few litres per second and a maximum of 30 l/s.

Rainfall and temperature data were obtained from the former S.I.M.N. These include all the stations present in the area and its surroundings (Fig. 1) and cover the period from 1950 to 2000. After reconstructing the missing data by means of multiple regressions between stations (chosen on the basis of elevations and distances), a mean annual isohyetal map was produced using the geostatistic *kriging* technique.

To calculate the actual evapotranspiration of the area, the Turc's formula (TURC, 1954) was applied to the individual stations and, subsequently, a map was plotted of lines of equal magnitude for the parameter. This method was chosen because the lack of data concerning specific meteorological dimensions did not enable physical methods (e.g. those based on the work by PENMAN, 1948) to be used. However, it must be noted that, at least for Central Italy, the Turc method appeared to give rise to good results (for example, DE FELICE & DRAGONI, 1991; BONO, 1993).

The study of the River Marta flow was based on the streamflow records collected by the former S.I.M.N. in the two gauging stations mentioned above. Available data consist of daily streamflow measurements in the period 1948-1985 for Ponte Cartiera station and 1936-1972 for Centrale Traponzo station, with some lacunae.

The two series of data cover a period longer than 30 years, so they can be considered representative of the average flow of the river. The period of superimposition of the two series is 24 years, but they have been considered as a whole. This has been justified through the Student's t-test considering the annual mean and the variance both for

tesi è stata verificata attraverso il test *t* di Student considerando medie annuali e varianza dell'intera serie e del solo periodo di sovrapposizione. È risultato che la distribuzione campionaria cade all'interno degli intervalli di confidenza per il livello di significatività dello 0.01 e dello 0.05 per entrambe le sezioni di misura. Pertanto non esiste differenza significativa tra i due gruppi di dati, cioè tutto il periodo di misure disponibile ed i soli 24 anni di sovrapposizione.

Da una prima elaborazione dei dati storici di portata si è notato che la stazione di Ponte Cartiera (portata media annua $2.46 \text{ m}^3/\text{s}$) mostra una modesta variazione stagionale delle portate, drenando un bacino di circa 273 km^2 di cui 114 km^2 occupati dallo specchio lacustre. I valori registrati a Centrale Traponzo (portata media annua $7.54 \text{ m}^3/\text{s}$) hanno invece mostrato una più marcata variazione stagionale e, ovviamente, portate più elevate essendo il bacino drenato molto più ampio (complessivamente circa 851 km^2). La differenza di regime è legata al fatto che la stazione di Ponte Cartiera risente maggiormente dell'effetto modulatore del lago, come si può vedere dalla Figura 2, dove sono riportate a titolo di esempio le medie mensili della portata fluviale, delle precipitazioni della stazione meteorologica di Toscana e del livello del lago per due periodi significativi.

Il maggiore effetto modulatore del lago sulla stazione di Ponte Cartiera condiziona anche la forma della curva di durata, come si può vedere in Figura 3, che pone a confronto i grafici relativi alle due stazioni idrometrografiche (REGIONE LAZIO, 1998). Da questi grafici è stata ricavata la Q_{347} e la Q_{355} , ovvero i valori di portata che vengono in media superati, rispettivamente, per 347 e 355 giorni in un anno; questi valori caratteristici di portata sono utili nella definizione del deflusso minimo vitale.

Sono stati inoltre ricostruiti gli idrogrammi fluviali sulla base dei dati medi giornalieri delle due stazioni idrometrografiche. Per la stazione di Ponte Cartiera il deflusso totale (DT_{PC}), equivalente ad un volume medio annuo di $77.95 \times 10^6 \text{ m}^3$, è riconducibile interamente agli efflussi dal lago. L'idrogramma fluviale relativo alla stazione Centrale Traponzo invece è stato scomposto in deflusso di base e deflusso superficiale (Fig. 4) adottando il metodo semilogaritmico (MEYBOOM, 1961). Il volume medio annuo totale (DT_{CT}) è risultato di $235.07 \times 10^6 \text{ m}^3$, mentre quello relativo al solo deflusso di base (DB_{CT}) è risultato di $177.54 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Allo scopo di approfondire le conoscenze sull'andamento dei deflussi idrici nel bacino, relativamente anche a sezioni non strumentate, sono state eseguite delle campagne di misura delle portate fluviali. Le sezioni sono state scelte sulla base dell'articolazione della rete idrografica e dell'incidenza antropica sul regime fluviale. Per quanto riguarda l'asta principale, le misure della portata hanno riguardato, in particolare, le opere di presa dovute alle cinque centrali idroelettriche ed i relativi tratti depauperati del fiume.

Le misure sono state effettuate, lontano da eventi piovosi, in tre diversi periodi: Maggio 2004, Marzo 2005 e Maggio 2005. Nella Figura 5 sono riassunti alcuni risultati della campagna di misure effettuata a Marzo del 2005. Dai valori di portata riportati risulta che

the whole series and for the period of superimposition. It turned out that the population distribution is at the statistical level of significance of 0.01 and 0.05 for both stations. Thus it can be assumed that there is not a significant difference between the two samples of data, i.e. between the whole period of measurement and the 24 years of superimposition.

The processing of data showed that Ponte Cartiera station (average annual discharge $2.46 \text{ m}^3/\text{s}$) has a slight seasonal variation of discharges, draining a basin of some 273 km^2 , of which 114 km^2 are covered by the lake. Data of Centrale Traponzo station (average annual discharge $7.54 \text{ m}^3/\text{s}$) showed more pronounced seasonal variations and, obviously, higher discharges, draining a wider basin (about 851 km^2).

This different behaviour is linked to the position of Ponte Cartiera to the lake, thus undergoing its regulation effect, as shown in Figure 2, where monthly averages of discharges, precipitations of Toscana rain gauge and lake levels are reported.

The regulation effect on Ponte Cartiera station also influences the shape of the duration curve, as shown in Figure 3, where the graphs of the two stations are compared (REGIONE LAZIO, 1998). On the basis of these graphs the Q_{347} and Q_{355} (discharge rates that are exceeded in 347 and 355 days per year) were determined. These particular values are helpful in the instream flow determination.

The river hydrographs were built on the basis of daily average data of the two gauging stations.

The overall streamflow of Ponte Cartiera (DT_{PC}), correspondent to an average volume of $77.95 \times 10^6 \text{ m}^3$ per year, completely depends on the lake outlet. Instead, the Centrale Traponzo hydrograph has been separated into baseflow and surface runoff (Fig. 4) through the semilogarithmic method (MEYBOOM, 1961). The overall streamflow (DT_{CT}) turned out to be $235.07 \times 10^6 \text{ m}^3$, while the contribution of baseflow (DB_{CT}) was $177.54 \times 10^6 \text{ m}^3$.

In order to extend the knowledge on the basin flows, additional streamflow measurements were carried out, even in new sections. These sections have been chosen on the basis of the articulation of the stream pattern, considering also the man-made hydraulic structures established on the river. As far as the master course is concerned, new measurements affected the portions of river spoiled by the five hydroelectrical power stations.

Measurements were carried out in three different periods, without rain: May 2004, March 2005 and May 2005. Figure 5 summarises the sections measured in the March 2005 survey. From the reported values, it turns out that discharge increments were found in the lower portion of the hydrographic net, especially in River Marta, tributaries Leia, Biedano and Traponzo. Furthermore, it is evident that a considerable amount of water is diverted by the power stations, leaving just a small flow rate.

INTERACTIONS BETWEEN GROUNDWATER AND RIVER MARTA (CENTRAL ITALY) AND PROBLEMS RELATED TO THE DEFINITION OF THE INSTREAM FLOW

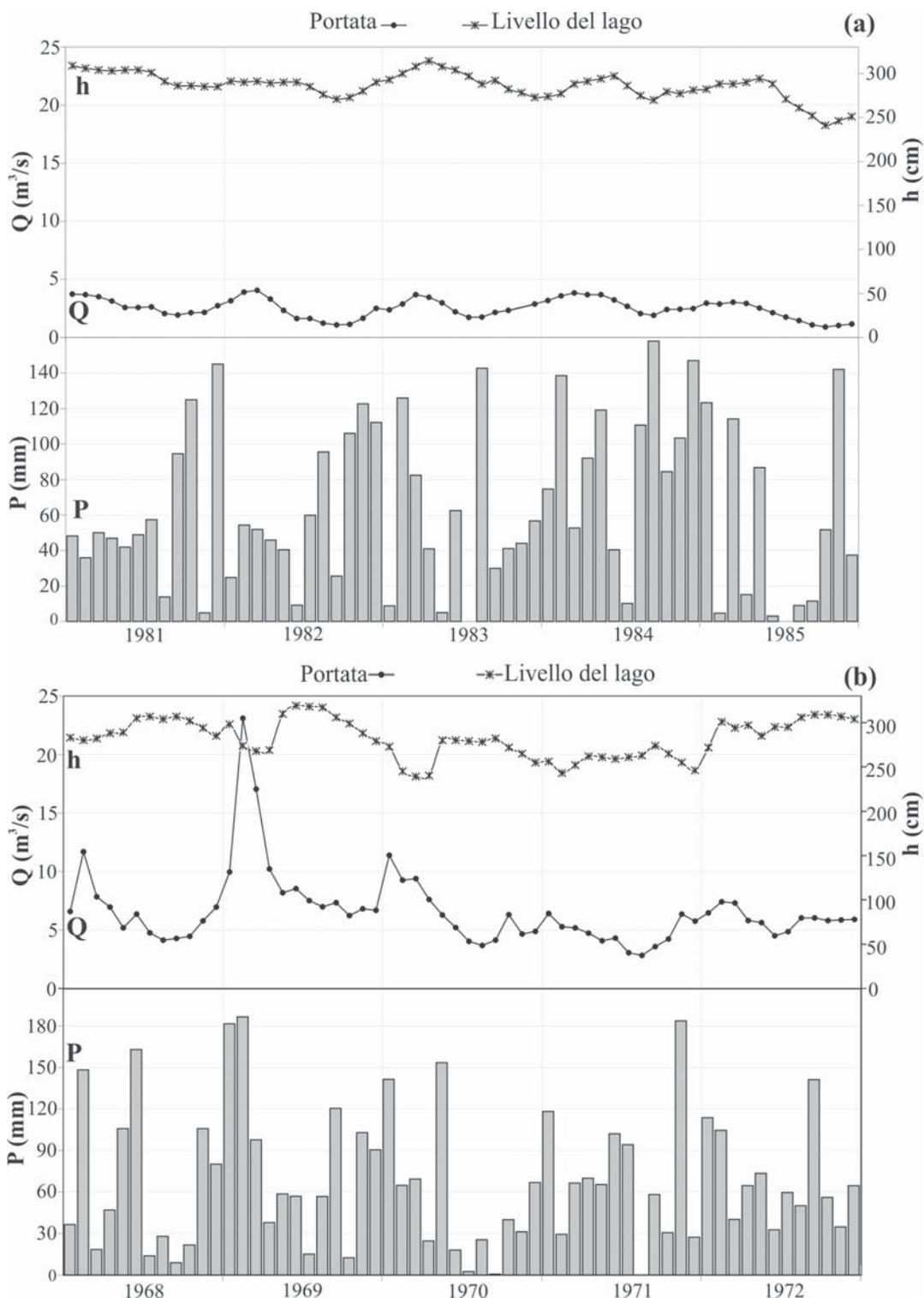


Fig. 2 - Confronto tra le portate fluviali (Q), i livelli idrometrici del Lago di Bolsena (h), riferiti alla quota di 305 m s.l.m., e le precipitazioni della stazione di Tuscania (P): a) stazione di Ponte Cartiera, b) stazione di Centrale Traponzo
 - Relation among streamflow rates (Q), water level of the Lake Bolsena (h), referring to the elevation 305 m asl, and rainfall of Tuscania meteorological station (P): a) Ponte Cartiera gauging station, b) Centrale Traponzo gauging station

incrementi in alveo considerevoli sono stati registrati nel tratto finale del reticolo fluviale, nell'asta del Fiume Marta e nei torrenti Leia, Biedano e, dopo la loro confluenza, nel Traponzo. Dalle misure risulta inoltre che nei segmenti fluviali interessati dalle centrali idroelettriche viene derivata gran parte della portata naturale, lasciando solo modesti residui di portata in alveo.

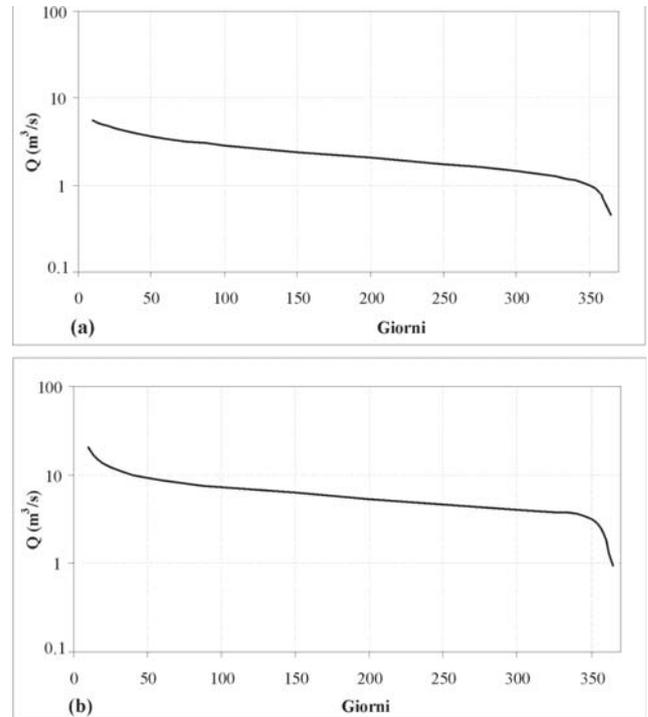


Fig. 3 - Curva di durata delle portate per le stazioni idrometrografiche di Ponte Cartiera (a) e Centrale Traponzo (b) (da Regione Lazio, 1998)
- Duration curve of Ponte Cartiera (a) and Centrale Traponzo gauging stations (b) (after Regione Lazio, 1998)

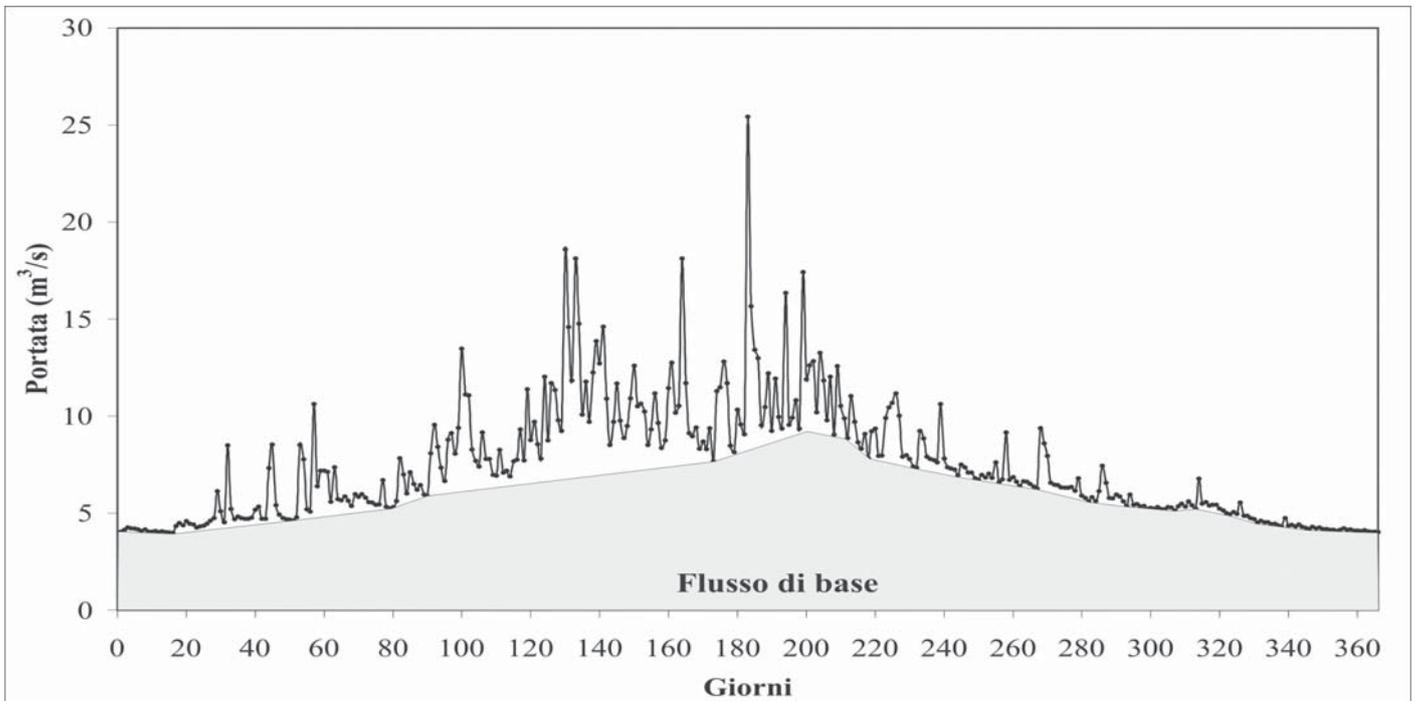


Fig 4 - Scomposizione dell'idrogramma fluviale medio della stazione Centrale Traponzo
- Separation of the average stream hydrograph recorded at the Centrale Traponzo gauging station

SCHEMA DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA

La caratterizzazione idrogeologica dei litotipi affioranti nell'area in esame ha permesso di raggruppare le diverse formazioni in complessi idrogeologici (Tab. 2).

Sulla base di questa caratterizzazione, risulta che le principali rocce serbatoio del bacino sono rappresentate dai complessi di origine vulcanica, ovvero i complessi lavico, piroclastico e piroclastico incoerente. Le rocce vulcaniche e vulcanoclastiche, infatti, sono caratterizzate da un più alto grado di permeabilità relativa, da significativi spessori, variabili generalmente da alcuni metri fino a diverse decine di metri, e da una notevole estensione nel bacino, occupandone circa il 73% (Fig. 5). Tali complessi di età pleistocenica sono sovrapposti alle formazioni sedimentarie plio-pleistoceniche e cretaco-mioceniche, ricadenti nei complessi argilloso-sabbioso-conglomeratico e marnoso-calcareo-arenaceo (Fig. 6). Questi ultimi due complessi hanno una permeabilità relativa nettamente più bassa rispetto alle rocce vulcaniche e vulcanoclastiche; rappresentano pertanto il substrato impermeabile dell'acquifero vulcanico. Nell'ambito dell'area di studio, l'impermeabile relativo affiora ai margini meridionali del bacino e all'interno del bacino stesso (Fig. 5 e 6), condizionando le modalità di flusso dell'acquifero vulcanico.

Lo schema di circolazione idrica sotterraneo è stato ricostruito attraverso i dati relativi ai pozzi ed alle sorgenti censiti nell'area di indagine e nel suo intorno (Fig. 5), considerando le quote dei livelli idrici dei torrenti drenanti individuati durante le diverse campagne di misura e tenendo conto dei limiti degli affioramenti dell'impermeabile relativo. Sulla base di questi dati, è stata ricostruita una morfologia piezometrica mediata in base ai livelli piezometrici relativi all'ultimo decennio (1987-2004). Questa scelta non è stata casuale in quanto l'obiettivo era proprio quello di ottenere una superficie piezometrica che permettesse di individuare i limiti indicativi del bacino idrogeologico rappresentativo dell'ultimo decennio, quello più

HYDROGEOLOGICAL LAYOUT

The hydrogeological characterization of the outcropping rocks enabled to group the different formations into hydrogeological complexes. The main characteristics of the hydrogeological complexes recognized are given in Table 2.

On the basis of this analysis it concludes that the aquifer is constituted by the volcanic complexes, i.e. the lavas, pyroclastic and unconsolidated pyroclastic complexes. As a matter of fact the volcanic and vulcanoclastic rocks are characterized by high relative permeability, a significant thickness (generally from some meters to some tens of meters) and a more extensive outcropping in the area, occupying about 73% of the total basin area. These hydrogeological complexes of Pleistocene age are overlapped to Plio-Pleistocene and Cretaceous-Miocene sedimentary rocks grouped in the clayey-sandy-conglomeratic and marly-calcareous-arenaceous complexes (Fig. 6). These latter two complexes are characterized by low relative permeability and define the lower limit of the volcanic aquifer. In the study area, the low permeable basement outcrops on the southern edge of the basin and in the central part (Figs. 5 and 6) affecting the groundwater flow modalities of volcanic aquifer.

The conceptual hydrogeological model has been reconstructed through the data concerning the wells and springs located in the basin and in its neighbourhood, the head of the water level of the gaining streams detected during the streamflow measurements and considering the limits of the low-permeable complexes (Fig. 5). Using the data it was possible to reconstruct the aquifer's potentiometric surface which can be considered a mean surface on the piezometric levels of the last decade (1987-2004). This choice was motivated by the aim to obtain a potentiometric map in order to define the representative flow directions and divides of the last decade, those more affected from the possible withdrawals from the aquifer. According to this aim it has chosen the contour level separation (50 m) in such a way to reduce the effects of the seasonal

Complesso idrogeologico Hydrogeological complex	Tipo di permeabilità Permeability type	Grado di permeabilità relativa Relative permeability	Area (km ²)	% Area tot
Alluvionale Alluvial complex	per porosità primary porosity	da medio a basso medium- low	59.0	10.2 %
Travertini Travertines complex	per fessurazione e porosità secondary and primary porosity	da basso a medio low- medium	10.9	1.9 %
Piroclastico incoerente Unconsolidated pyroclastic complex	per porosità primary porosity	da alto a medio high- medium	80.3	14.0 %
Piroclastico Pyroclastic complex	per porosità e fessurazione primary and secondary porosity	da medio ad alto medium-high	274.7	47.5 %
Lavico Lavas complex	per fessurazione secondary porosity	da alto a medio high-medium	65.8	11.4 %
Argilloso-sabbioso-conglomeratico Clayey-sandy-conglomeratic complex	per porosità primary porosity	molto basso very low	8.4	1.4 %
Marnoso-calcareo-arenaceo Marly-calcareous-arenaceous complex	per fratturazione secondary porosity	da basso a molto basso low-very low	78.5	13.6 %

Tab. 2 - Sintesi delle caratteristiche dei complessi idrogeologici individuati nel bacino
- Summary of the characteristics of the hydrogeological complexes identified

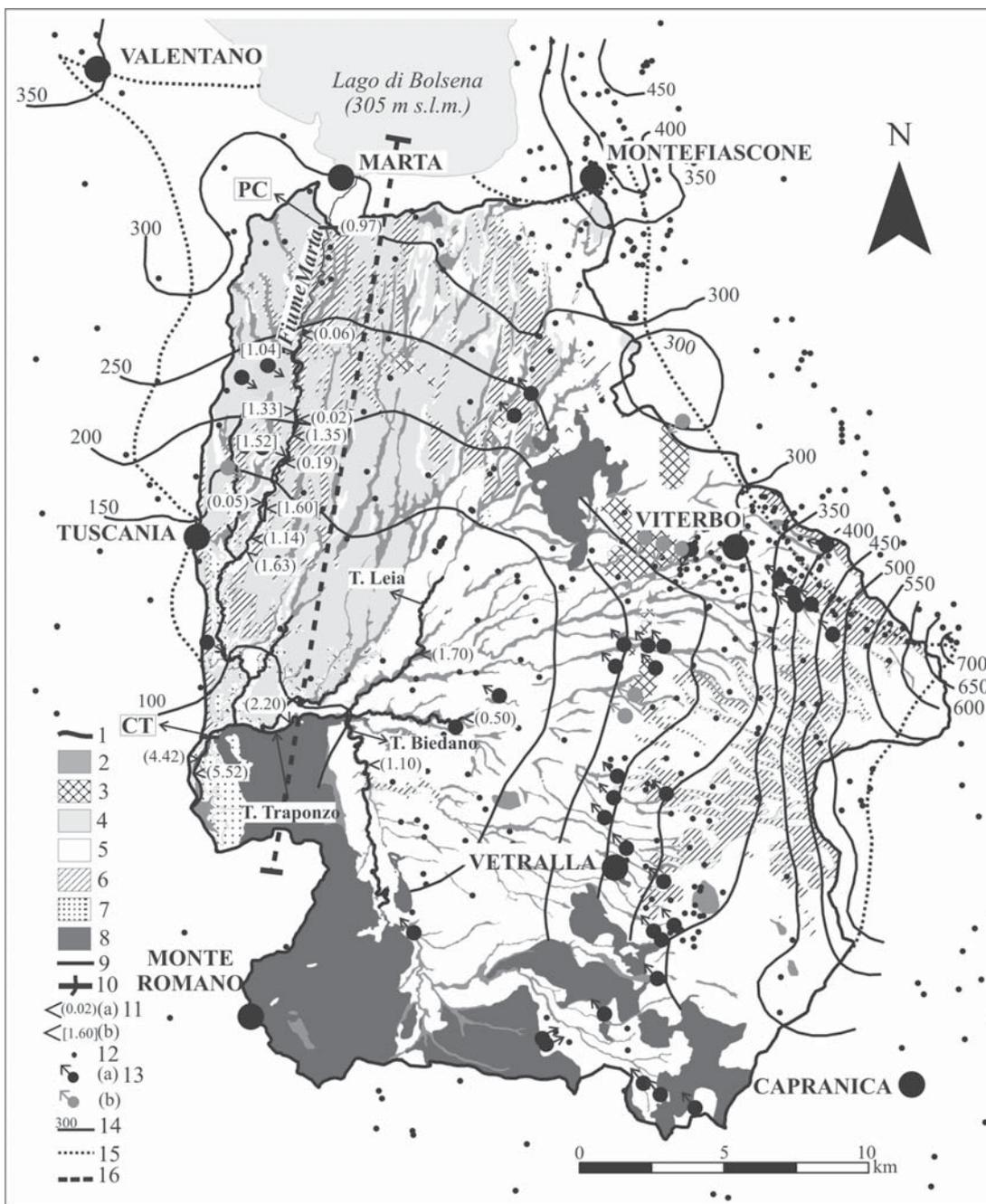


Fig. 5 - Carta idrogeologica schematica. 1 - Limite del bacino superficiale; 2 - Complesso alluvionale; 3 - Complesso dei travertini; 4 - Complesso piroclastico incoerente; 5 - Complesso piroclastico; 6 - Complesso lavico; 7 - Complesso argilloso-sabbioso-conglomeratico; 8 - Complesso marnoso-calcareo-arenaceo; 9 - Principali rami drenanti del reticolo idrografico; 10 - Stazioni idrometrografiche (PC: Ponte Cartiera; CT: Centrale Traponzo); 11 - Sezioni di misura della portata e relativo valore di portata in m^3/s nel Marzo 2005 (a: misura nell'alveo naturale; b: misura nel canale di derivazione); 12 - Pozzi utilizzati per la ricostruzione della superficie piezometrica; 13 - Sorgenti (a: normali; b: termali o minerali); 14 - Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; 15 - Limite presunto del bacino idrogeologico; 16 - Traccia della sezione idrogeologica (cfr. Fig. 6)

- Simplified hydrogeological map. 1 - Watershed; 2 - Alluvial complex; 3 - Travertine complex; 4 - Unconsolidated pyroclastic complex; 5 - Pyroclastic complex; 6 - Lavas complex; 7 - Clayey-sandy-conglomeratic complex; 8 - Marly-calcareous-arenaceous complex; 9 - Main gaining streams; 10 - Gauging stations of streamflow (PC: Ponte Cartiera station; CT: Centrale Traponzo station); 11 - Streamflow measurements and value of discharge in m^3/s referring to March 2005 (a: natural river-bed; b: catchment canal); 12 - Wells considered for the potentiometric surface reconstruction; 13 - Springs (a: fresh water; b: thermal or mineral water); 14 - Piezometric contour lines and elevation in m asl; 15 - Supposed groundwater divide; 16 - Trace of hydrogeological cross-section (cf. Fig. 6)

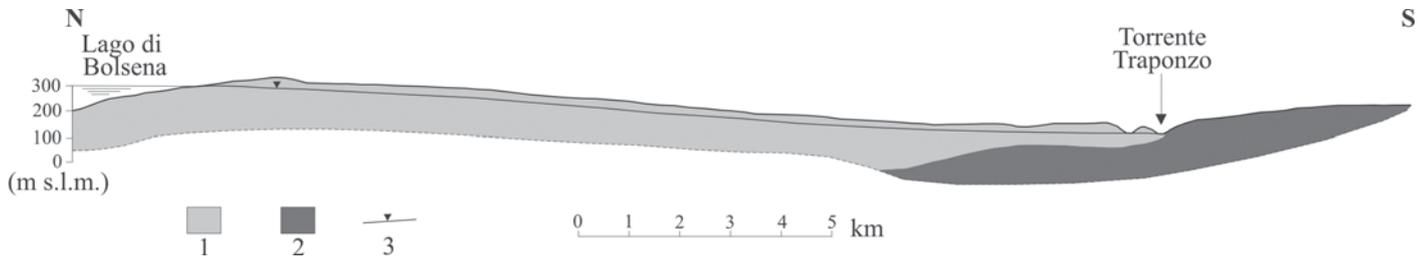


Fig. 6 - Sezione idrogeologica schematica. 1 - Acquifero vulcanico; 2 - Substrato a bassa permeabilità; 3 - Livello piezometrico
 - Simplified hydrogeological cross-section. 1 - Volcanic aquifer; 2 - Low permeable basement; 3 - Groundwater level

influenzato dagli eventuali pompaggi dall'acquifero. In tal senso l'equidistanza delle isopiezometriche (50 m) è stata scelta in modo da trascurare gli effetti dovuti alla variazione di livello piezometrico stagionale (generalmente inferiore a qualche metro).

La superficie piezometrica così ricostruita (Fig. 5) evidenzia una morfologia radiale convergente verso il basso corso del Fiume Marta ed il Torrente Traponzo. Lo spartiacque sotterraneo individuato non sempre coincide con quello superficiale, in particolare il bacino idrogeologico è più esteso (circa 645 km²) di quello superficiale (circa 578 km²). A nord il bacino idrogeologico è aperto a flussi in entrata dal lago per una lunghezza di circa 10 km, essendo la quota piezometrica in questa fascia inferiore a quella del livello idrico del lago (Fig. 5 e 6). A nord-est lo spartiacque sotterraneo è condizionato da un locale alto piezometrico circoscritto dalla curva isopiezometrica dei 300 m s.l.m. In questa zona è probabile che la morfologia piezometrica sia influenzata dalle risalite di flussi idrici profondi che alimentano dal basso l'acquifero vulcanico, oltre che le sorgenti termali di Viterbo (PISCOPO *et alii*, 2006).

Dalla spaziatura delle curve isopiezometriche si nota che il gradiente idraulico è più elevato nei settori nord-orientale ed orientale (da 6% a 4%), diminuisce invece nel settore meridionale. Ciò è da ricondurre, probabilmente, alla più alta trasmissività dell'acquifero in quest'ultimo settore. Si hanno riscontri in tal senso dalla bibliografia per la zona compresa tra Viterbo, Vetralla ed i corsi d'acqua Leia e Biedano (BAIOCCHI *et alii*, 2006). Invece per l'area intorno a Tuscania è da considerare la presenza di pozzi con portate di esercizio tra 4 e 7 l/s, quando la maggior parte dei pozzi censiti non supera 2 l/s.

In merito ai rapporti tra falda e reticolo fluviale, la morfologia piezometrica ricostruita mostra in generale una convergenza verso il basso corso del Fiume Marta e dei suoi tributari (Leia, Biedano e Traponzo). Questi rami del reticolo fluviale sono i principali recapiti della falda, in accordo con i notevoli incrementi di portata misurati nel corso delle indagini (complessivamente, 1.8, 4.5 e 2.5 m³/s in Maggio 2004, Marzo 2005 e Maggio 2005) e con la limitata portata delle sorgenti censite (complessivamente circa 0.3 m³/s). In particolare il corso principale del Fiume Marta inizia a diventare drenante a circa 6 km a monte di Tuscania; fino a questa sezione non sono evidenti particolari deformazioni della morfologia piezometrica, la quota dell'alveo è superiore a quella della falda e non sono stati misurati significativi incrementi di portata nel fiume (Fig. 5).

variations of piezometric level (generally less of few meters).

The reconstructed potentiometric surface, shown in Figure 5, highlights a radial convergent flow oriented towards the low-course of the River Marta and Stream Traponzo. The groundwater divide does not always follow the watershed, in particular the hydrogeological basin is wider (about 645 km²) than the drainage basin (about 578 km²). Northwards the hydrogeological basin is open to groundwater inflow from the lake along a section of about 10 km, being the piezometric head lower than the lake level. Along the north-eastern margin the groundwater divide is controlled by a local piezometric high, circumscribed with the contour line of 300 m asl. In this area the potentiometric morphology can be interpreted as being due to the deep groundwater rise which feeds partly the volcanic aquifer and partly the thermal springs of Viterbo (PISCOPO *et alii*, 2006).

The spacing of the piezometric contour lines show that the hydraulic gradient is higher in the north-eastern and eastern sectors (from 0.06 to 0.04) than in the southern part of the basin. It is probably due to the highest transmissivity of this last sector of the aquifer. There is checking of this hypothesis for the area bordered by Viterbo, Vetralla and streams Leia and Biedano (BAIOCCHI *et alii*, 2006). For the area around Tuscania it must be borne in mind that the well yield is between 4 and 7 l/s, whereas the most of the wells do not exceed 2 l/s.

Regarding the relationship between groundwater and streams, the potentiometric surface show a convergent flow towards the low-course of the River Marta and its tributaries (Leia, Biedano and Traponzo streams). These branches of hydrographic network are the main discharge of the volcanic aquifer, according to the high flow rate increments measured in the streams during the investigation (on the whole 1.8, 4.5 and 2.5 m³/s in May 2004, March 2005 and May 2005) and the reduced flow rate of the examined springs (on the whole about 0.3 m³/s). In particular the River Marta starts to increase its flow rate not far from Tuscania (at about 6 km from the town). Until this river section the potentiometric surface does not show any pattern deformation, the water level of the river is higher than the groundwater level and there were no measured significant flow rate increments (Fig. 5).

The reconstructed potentiometric surface has been compared with that quoted from CAPELLI *et alii* (2005) which used piezomet-

La superficie piezometrica ricostruita è stata confrontata con quella riportata in CAPELLI *et alii* (2005) elaborata su misure piezometriche più omogenee temporalmente, essendo relative al periodo 2002-2003. In generale le due ricostruzioni sono confrontabili, differenze di quote piezometriche sono riscontrabili solo nel settore orientale (a monte dell'abitato di Viterbo) e nel settore nord-occidentale (presso l'abitato di Valentano). Anche l'elaborato riportato in CAPELLI *et alii* (2005) evidenzia un bacino idrogeologico più ampio di quello superficiale, in particolare se si tiene conto della stessa sezione di riferimento sul Fiume Marta la differenza tra i due bacini idrogeologici è inferiore a 20 km².

VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE

Una prima valutazione del bilancio idrologico medio annuo è stata condotta con riferimento al bacino superficiale del Fiume Marta, nella porzione oggetto di studio (circa 578 km²). L'equazione considerata è la seguente:

$$P - ETR = D \quad (1)$$

dove:

P = precipitazioni (in m³/anno);

ETR = evapotraspirazione reale (in m³/anno);

D = deflusso totale (in m³/anno) comprensivo del ruscellamento (R) e dell'infiltrazione efficace (I).

Il termine P , valutato sulla base della carta delle isoiete, è risultato di 514.64×10⁶ m³/anno. Il termine ETR , valutato sulla base della carta delle isoevapotraspire, è risultato di 347.14×10⁶ m³/anno. Pertanto il deflusso totale D è pari a 167.50×10⁶ m³/anno (Tab. 3).

Questo valore di D è stato confrontato con quello ricavato dalla differenza tra i deflussi totali medi annui relativi alle due stazioni idrometrografiche ($DT_{CT} - DT_{PC}$) che definiscono il bacino superficiale, risultata pari a 157.12×10⁶ m³/anno. I due valori sono diversi per circa il 6% e pertanto sembra essere confermata la valutazione dell'evapotraspirazione reale, ricavata attraverso la relazione empirica di Turc.

Per calcolare l'infiltrazione efficace (I) relativa al bacino superficiale è stata considerata la differenza tra il deflusso di base della stazione idrometrografica di Centrale Traponzo ed il deflusso totale

ric data referred to a homogeneous period of time (2002-2003). The comparison showed that the differences between the two reconstructions were minor with the exception of the eastern (around Viterbo) and north-western sectors (around Valentano) where there are some differences in the piezometric contour lines. The potentiometric surface reported in CAPELLI *et alii* (2005) also highlights a hydrogeological basin wider than the drainage basin; the difference of the surface area between the two hydrogeological basins is less than 20 km² considering the same river section.

EVALUATION OF WATER RESOURCES

A preliminary estimate of the average annual water budget was carried in respect to the surface area of the drainage basin of the River Marta extended between the two gauging stations of stream-flow (about 578 km²). The calculation was carried out using the following expression:

$$P - ETR = D \quad (1)$$

where

P = rainfall (in m³/year);

ETR = actual evapotranspiration (in m³/year);

D = overall water flow (in m³/year), that is to say the sum of surface runoff (R) and effective infiltration (I).

The term P resulted 514.64×10⁶ m³/year on the basis of the isohyetal map. The term ETR resulted of 347.14×10⁶ m³/year on the basis of the evapotranspiration map. Therefore the overall water flow D resulted 167.50×10⁶ m³/year (Tab. 3).

The calculated value of D has been compared with that obtained from the difference between the mean overall streamflow of the two gauging stations ($DT_{CT} - DT_{PC} = 157.12 \times 10^6$ m³/year) that define the drainage basin. The two values differ from one another by 6%, therefore it seems to be validated the Turc method for the evaluation of the actual evapotranspiration.

To evaluate the effective infiltration (I) on the drainage basin the difference between the baseflow of the Centrale Traponzo station and the overall streamflow of the Ponte Cartiera station was considered.

Termine / terms	Valore / value in mm	Valore / value in m ³ × 10 ⁶
Precipitazioni (P) Precipitation (P)	891.0	514.64
Evapotraspirazione reale (ETR) Actual evapotranspiration (ETR)	601.0	347.14
Deflusso totale (D) Overall water flow (D)	290.0	167.50
Infiltrazione efficace (I) Effective infiltration (I)	172.4	99.59
Ruscellamento (R) Runoff (R)	99.6	57.53

Tab. 3 Risultati del bilancio idrologico medio annuo
- Summary of the mean annual water budget

della stazione di Ponte Cartiera ($I = DB_{CT} - DT_{PC}$), risultata pari a 99.59×10^6 m³/anno. Di conseguenza il ruscellamento (R) è stato calcolato dalla differenza tra deflusso totale e deflusso di base della stazione di Centrale Traponzo ($R = DT_{CT} - DB_{CT}$), risultata pari a 57.53×10^6 m³/anno. È stato inoltre calcolato il valore dell'indice di deflusso di base (IDB) ricavato considerando il rapporto tra deflusso di base della stazione idrometrografica di Centrale Traponzo ed il deflusso totale della stessa stazione, depurati del deflusso relativo alla stazione di Ponte Cartiera:

$$IDB = (DB_{CT} - DT_{PC}) / (DT_{CT} - DT_{PC}) \quad (2)$$

È risultato un valore del IDB di 0.63. Questo valore ricade nell'intervallo dei coefficienti di infiltrazione potenziali (CIP = I/D) riportati in bibliografia (CELICO, 1988; CIVITA, 2005) per i complessi idrogeologici presenti nel bacino in esame, se si considera che l'85% del bacino è costituito da complessi relativamente permeabili (complessi alluvionale, dei travertini, piroclastico incoerente, piroclastico e lavico), ai quali la bibliografia attribuisce valori del CIP compresi tra 0.5 e 0.9, ed il 15% è costituito da complessi relativamente poco permeabili (complessi argilloso-sabbioso-conglomeratico e marnoso-calcareo-arenaceo), ai quali la bibliografia attribuisce valori del CIP compresi tra 0.1 e 0.3.

Questa prima valutazione del bilancio idrologico medio annuo è stata condotta considerando la coincidenza del bacino superficiale con quello idrogeologico. Come detto in precedenza, essi non corrispondono, pertanto una espressione più completa che tiene conto anche dell'impatto antropico sul sistema è la seguente:

$$A_S + P = ETR + R + I + P_v \quad (3)$$

dove:

A_S = apporti di acque sotterranee extrabacinali (in m³/anno);

P_v = prelievi idrici aventi recapito all'esterno del bacino superficiale (in m³/anno).

I termini P , ETR , R ed I sono stati precedentemente stimati; pertanto dalla precedente espressione (3) si ricava che:

$$A_S = P_v \quad (4)$$

Per questi due termini non si hanno elementi specifici a causa della mancanza di dati di dettaglio. Tuttavia una stima è possibile per il termine A_S che include i flussi idrici sotterranei dal lago e dalla porzione di bacino idrogeologico esterno al bacino superficiale. I flussi idrici sotterranei dal lago sono non superiori a 25×10^6 m³/anno, se si applica la relazione di Darcy al limite alimentante, considerando la lunghezza della sezione di flusso ed i gradienti idraulici risultanti dalla ricostruzione piezometrica ed un valore di trasmissività medio della sezione di 5×10^{-3} m²/s. Il valore di trasmissività adottato sembra essere quello massimo attribuibile alla sezione di flusso, se si considera la natura dell'acquifero e gli intervalli di valori della trasmissività ricavati in realtà idrogeologiche simili, quali quelle dell'acquifero cimino-vicano (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

Per stimare gli apporti idrici sotterranei dalla porzione di bacino idrogeologico esterno al bacino superficiale, è stato determinato il rendimento medio unitario in acque sotterranee del bacino, conside-

It resulted that the term I corresponds to 99.59×10^6 m³/year. Therefore the term R was calculated from the difference between the overall streamflow of the Centrale Traponzo station and the baseflow of the same station. It resulted that the term R corresponds to 57.53×10^6 m³/year.

Moreover, the index of baseflow (IDB) was calculated taking into consideration the ratio between the baseflow of the Centrale Traponzo station and the overall streamflow of the same station subtracting the streamflow of the Ponte Cartiera station:

$$IDB = (DB_{CT} - DT_{PC}) / (DT_{CT} - DT_{PC}) \quad (2)$$

The value of IDB results of 0.63: this value falls into the range of potential infiltration coefficients (CIP=I/D) reported in the literature (CELICO, 1988; CIVITA, 2005) for the hydrogeological complexes outcropping in the area under consideration. In fact the 85% of surface area of the drainage basin is constituted by relative permeable complexes (alluvial, travertine, lavas, pyroclastic and unconsolidated pyroclastic complexes), which are characterized by values of CIP from 0.5 to 0.9 in the literature, and the 15% of the surface area is constituted by low-permeable complexes (clayey-sandy-conglomeratic and marly-calcareous-arenaceous complexes), which are characterized by values of CIP from 0.1 to 0.3 in the literature.

This first evaluation of the mean annual water budget was conducted considering much correspondence between the hydrogeological basin and drainage basin. On the contrary this it was not the result of the analysis of groundwater flow; therefore a more complete expression of the water budget that takes into consideration water resources uses is the following:

$$A_S + P = ETR + R + I + P_v \quad (3)$$

where

A_S = groundwater inflow from the areas outside the drainage basin (in m³/year);

P_v = water withdrawals going out from the drainage basin (in m³/year).

The expression (3) becomes the following, considering the values of P, ETR and I previously estimated:

$$A_S = P_v \quad (4)$$

Data covering these last two terms are very scarce.

Only a first estimate is possible for the term A_S which include the groundwater inflow from the lake and from the area outside the drainage basin. The groundwater inflow from the lake does not exceed 25×10^6 m³/year if Darcy's equation is applied to the section identified through the potentiometric surface using the local hydraulic gradient and a mean value of transmissivity of 5×10^{-3} m²/s. The used value of the hydrogeological parameter seems to be the highest one which can be attributed to the flow section, if one considers the nature of the aquifer and the range of transmissivity values obtained in similar hydrogeological situations, such as that of the Cimino-Vico aquifer (BAIOCCHI *et alii*, 2006). To evaluate the groundwater inflow from the area outside the drainage basin a specific mean groundwater yield of surface area was determined,

rando il rapporto I/A (dove A è la superficie del bacino superficiale). Il valore risultante, pari a circa $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ per km^2 , è stato esteso alla superficie di bacino idrogeologico esterna al bacino superficiale (circa 69 km^2), calcolando un volume di circa $12 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

Quindi il termine A_S è stimabile in circa $37 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ totali. Questo volume dovrebbe uguagliare l'entità dei prelievi idrici dal bacino non aventi recapito nella sezione fluviale di Centrale Traponzo. Detti prelievi sono da attribuire principalmente alle pratiche agricole, considerato che i quantitativi idrici destinati all'uso potabile ed industriale ritornano in gran parte al corso d'acqua prima della stazione idrometrografica di Centrale Traponzo.

I prelievi irrigui possono essere stimati considerando l'estensione delle aree irrigue presenti nel bacino (circa 255 km^2 in base alla carta di uso del suolo; Commissione Europea, 2000), ed una perdita netta di circa 5 l/s per km^2 di superficie irrigata, desunta dalla differenza tra evapotraspirazione potenziale e reale calcolata per l'acquifero cimino-vicano (BAIOCCHI *et alii*, 2006). Risulta quindi un valore di P_v pari a circa $40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, che differisce di circa l'8% dal termine A_S stimato indipendentemente.

DEFLUSSO MINIMO VITALE

La crescente sensibilità verso la tutela dell'ambiente naturale ha portato negli ultimi decenni alla ricerca e alla necessità di una più chiara definizione dei deflussi da destinare alla conservazione degli ecosistemi acquatici, rispetto a quelli da destinare ad altri usi (quali quello irriguo, industriale e potabile). Il conflitto tra i due impieghi della stessa risorsa idrica (*instream uses e offstream uses*) ha reso necessario l'intervento normativo quale strumento per armonizzare e razionalizzare l'utilizzo delle acque superficiali. In tale contesto è stato introdotto il concetto di deflusso minimo vitale (DMV) la cui funzione è quella di riuscire a ponderare l'entità del rilascio minimo vitale a valle di un'utilizzazione, in modo da non alterare gli equilibri delle comunità acquatiche naturali e nello stesso tempo di considerare gli altri usi delle risorse idriche.

I metodi utilizzati per determinare il DMV sono molteplici (per esempio, SPAGGIARI *et alii*, 1997). In generale è possibile distinguere metodi che hanno un approccio indiretto, dove il DMV viene ricavato dai valori di portata del corso d'acqua e dalle caratteristiche del bacino e dell'alveo, ed altri che hanno un approccio sperimentale, dove il DMV viene ricavato da una relazione tra una variabile idraulica o strutturale del corso d'acqua e le esigenze ecologiche della specie considerata.

Il deflusso minimo vitale del Fiume Marta è stato calcolato considerando alcuni tra i metodi in uso in letteratura, selezionati in funzione dei dati disponibili e delle caratteristiche specifiche del bacino in esame.

I metodi selezionati sono:

- il criterio del contributo specifico adottato dalla Provincia Autonoma di Bolzano (VISMARA *et alii*, 1999), che prevede una portata residua in alveo di 2 l/s per km^2 di bacino sotteso dal

using the ratio I/A (where A is the surface area of the drainage basin). The resulted value (about of $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ per km^2) was extended to the surface area of the hydrogeological basin outside the drainage area (about 69 km^2), calculating an inflow of about $12 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.

On the whole the term A_S is then valued at some $37 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$. This volume could be equal to the amount of the water withdrawals going out from the basin. The withdrawals are mainly traced back to the water loss due to irrigation practices, considering that the drinking and industrial water needs, caught from springs and wells and diverted from the river, mainly return to the river before the Centrale Traponzo station.

A rough evaluation of water losses due to irrigation is possible using the extent of the irrigated area (about 255 km^2 ; COMMISSIONE EUROPEA, 2000) and the net loss of 5 l/s per km^2 resulting from the difference between potential and actual evapotranspiration calculated for the Cimino-Vico aquifer (BAIOCCHI *et alii*, 2006). A value of P_v around $40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ was calculated. P_v differs of some 8% from the term A_S , which was independently evaluated.

INSTREAM FLOW

The increasing attention towards environmental issues led to the need of an explicit definition of the flow rate to be preserved for aquatic ecosystems, instead of being used in other ways (such as for irrigation, industrial and human consumption). The conflict between the two uses (*instream and offstream*) led to a normative participation focused on the harmonization and rationalization of the employment of surface waters. In this context, the term "instream flow" (IF) has been introduced with the aim to balance the water requirements of the aquatic communities with other needs.

Many methods are used to determine the IF (for example, SPAGGIARI *et alii*, 1997). Some of them have an indirect approach, i.e. the IF is based on the stream rate flows and on the basin and stream bed conformation, while others are experimental and consider both hydraulics and ecology.

The IF of River Marta has been calculated applying several methods found in literature, selected on the basis of available data and of the basin characteristics.

Selected methods are listed below:

- the specific yield procedure, adopted by the Autonomous Province of Bolzano (VISMARA *et alii*, 1999), which requires a IF of 2 l/s per km^2 of basin;
- the Tennant's Montana method (TENNANT, 1976) which differentiates a minimum flow rate (Q_{\min}) equal to 10% of the mean annual streamflow, recommended for a sufficiently acceptable quality for short periods; a good flow rate (Q_{good}) equal to 30% of the mean annual streamflow, recommended for a good quality habitat, and an optimum flow rate (Q_{opt}) equal to 60-100% of the mean annual streamflow, recommended for the best habitat conditions;

INTERACTIONS BETWEEN GROUNDWATER AND RIVER MARTA (CENTRAL ITALY) AND PROBLEMS RELATED TO THE DEFINITION OF THE INSTREAM FLOW

- corso d'acqua;
- il metodo Montana (TENNANT, 1976), che individua: una portata Q_{MINIMA} , equivalente al 10% della portata media annua, raccomandata per mantenere un habitat di qualità appena accettabile per brevi intervalli di tempo; una portata Q_{BUONA} , equivalente al 30% della portata media annua, raccomandata per mantenere un habitat di buona qualità; un intervallo di portata Q_{OTTIMA} , equivalente al 60-100% della portata media annua, raccomandato perché siano verificate le migliori condizioni ambientali nell'habitat di riferimento;
- il criterio adottato in Svizzera, che determina i deflussi minimi vitali sulla base dei valori di portata con durata pari a 347 giorni (Q_{347});
- uno dei criteri adottati in Germania che considera una frazione della Q_{355} .

Gli anzidetti metodi sono stati applicati alle due sezioni d'alveo strumentate, quella di Ponte Cartiera e quella di Centrale Traponzo; le determinazioni relative alla prima sezione considerata sono state ritenute indicative anche per la sezione d'alveo della Centrale Fioritella, dove è presente l'ultima derivazione idroelettrica dell'asta principale del Marta e drena un bacino poco più esteso di quello relativo alla sezione di Ponte Cartiera (Fig. 1).

I risultati dell'applicazione dei diversi metodi considerati sono riportati nella Tabella 4, insieme alle valutazioni riportate in bibliografia per le stesse sezioni d'alveo (REGIONE LAZIO, 1998; CALENDA

- the method applied in Switzerland, based on the flow rates which are exceeded in more than 347 days per year (Q_{347});
- one of the criteria adopted in Germany which considers a fraction of Q_{355} .

These methods have been applied to the Ponte Cartiera and Centrale Traponzo stations; results obtained in the first one have been considered representative for the Centrale Fioritella derivation as well. The Centrale Fioritella is the last hydroelectric power station on the River Marta (Fig. 1) and its drained basin is slightly bigger than the one of Ponte Cartiera.

Table 4 summarises the results of the different methods applied. They are compared to the evaluations described in literature for the same river sections (REGIONE LAZIO, 1998; CALENDA *et alii*, 2000) which applied the IFIM method (BOVEE, 1982) and the method used by the EPA (SINGH & STALL, 1974; UBERTINI *et alii*, 1995) considering the minimum flow rate lasting 7 days with a return period of 10 years ($Q_{7/10}$).

The Montana's method value Q_{opt} is considered too cautious, so the instream flow at Ponte Cartiera turns out to be between 0.2 and 0.8 m³/s; as stated above, these values can be assigned to Centrale Fioritella as well (Tab. 4). Instream flow of the Centrale Traponzo section is between 0.7 and 2.4 m³/s (IFIM method not available).

It's worth noting that the difference between Q_{good} and $Q_{7/10}$ is less than 10%, while stronger differences arise among other methods.

Evaluated instream flow values have been compared with the present available water in two sections of the river. Streamflow at Centrale

	Ponte Cartiera	Centrale Fioritella	Centrale Traponzo
Area Bacino / Basin surface (A)	273 km ²	286 km ²	851 km ²
Portata media / Mean streamflow (Q)	2.46 m ³ /s	—	7.54 m ³ /s
Q₃₄₇*	1.1 m ³ /s	—	3.3 m ³ /s
Q₃₅₅*	0.9 m ³ /s	—	3.0 m ³ /s
Metodo del contributo specifico / Specific yield method			
($Q_{MV} = A \times 0.002$ m ³ /s)	0.55 m ³ /s	0.57 m ³ /s	1.70 m ³ /s
$Q_{MV} = 0.43 - 0.32 Q_{347}$	0.47 m ³ /s	—	1.06 m ³ /s
$Q_{MV} = 0.5 Q_{355}$	0.45 m ³ /s	—	1.50 m ³ /s
Metodo del Montana / Montana method			
$Q_{MV} = Q_{MIN} = (0.1 Q)$	0.25 m ³ /s	—	0.75 m ³ /s
$Q_{MV} = Q_{BUO} = (0.3 Q)$	0.75 m ³ /s	—	2.26 m ³ /s
Metodo della Q_{7/10}* / Q_{7/10}* method	0.69 m ³ /s	—	2.43 m ³ /s
Metodo IFIM* / IFIM* method			
$Q_{MV} = Q_{25\%}$	0.50 m ³ /s	—	—
$Q_{MV} = Q_{50\%}$	0.80 m ³ /s	—	—
Portate misurate (marzo 2005) Measured streamflow (March 2005)	0.97 m ³ /s	0.05 m ³ /s in alveo / river-bed 1.60 m ³ /s derivazione / canal	4.42 m ³ /s in alveo / river bed 1.10 m ³ /s derivazione / canal
Portate misurate (Maggio 2005) Measured streamflow (May 2005)	2.96 m ³ /s	—	5.48 m ³ /s totale / total

Tab. 4 - Determinazione del deflusso minimo (Q_{mv}) per alcune sezioni d'alveo, i valori con asterisco sono tratti da REGIONE LAZIO (1998) e da CALENDA *et alii* (2000)
- Instream flow (Q_{mv}) for some river-bed sections, the values with a star derived from REGIONE LAZIO (1998) and CALENDA *et alii* (2000)

et alii, 2000) e che riguardano il metodo IFIM (BOVEE, 1982) e quello della minima portata della durata di 7 giorni avente un tempo di ritorno di 10 anni ($Q_{7,10}$) adottato dall'EPA (SINGH & STALL, 1974; UBERTINI *et alii*, 1995).

Risulta che, escludendo il valore Q_{OTTIMA} del metodo Montana, eccessivamente cautelativo, per la sezione di Ponte Cartiera i valori della portata minima vitale sono compresi tra 0.2 e 0.8 m³/s; questi stessi valori possono essere attribuiti anche alla sezione di Centrale Fioritella (Tab. 4). Per la sezione di Centrale Traponzo, dove è presente l'ultima derivazione idroelettrica del bacino esaminato, i valori del deflusso minimo variano da 0.7 a 2.4 m³/s, anche se non è disponibile la valutazione mediante il metodo IFIM.

È significativo sottolineare che risulta una differenza percentuale inferiore al 10% tra i valori della Q_{BUONA} del metodo Montana e della $Q_{7,10}$, differenze più significative si riscontrano dal confronto dell'applicazione degli altri metodi.

I valori dei deflussi minimi determinati sono stati confrontati con le attuali disponibilità idriche del fiume in due delle sezioni dove sono presenti derivazioni. Per la sezione della centrale Fioritella, risulta che in alveo dovrebbero essere rilasciati deflussi compresi tra 0.2 e 0.8 m³/s. Invece dai riscontri effettuati nel Marzo 2005 è risultata che la portata fluviale è quasi del tutto derivata (Tab. 4). Questa situazione non sembra essere occasionale in quanto le caratteristiche dell'alveo tra la presa e la restituzione della derivazione sono molto alterate, evidenziando una sezione nettamente ridotta rispetto a quella naturale (Fig. 7); le stesse alterazioni del corso d'acqua sono state riscontrate in corrispondenza delle altre derivazioni presenti sul tratto a monte del Marta. Per la sezione di Centrale Traponzo la portata misurata in alveo nel Marzo 2005 è compatibile con quelle determinate per i deflussi minimi. In questo caso, se si considera una portata di derivazione di circa 1 m³/s, come quella misurata nel corso delle indagini, sono prevedibili portate critiche di rilascio in alveo solo in occasione di periodi magra, se si assume il valore della $Q_{7/10}$ quale limite superiore dell'intervallo dei deflussi minimi.

CONCLUSIONI

L'analisi dello schema idrogeologico dell'alto bacino del Fiume Marta ha permesso di esaminare i rapporti tra acque superficiali e sotterranee e di valutare l'entità delle risorse idriche.

È risultato che il deflusso del fiume è sostenuto, oltre che dagli efflussi dal Lago di Bolsena, dalle acque sotterranee. Il corso d'ac-



Fig. 7 - Sezione dell'alveo del Fiume Marta prima (A) e dopo (B) la derivazione della centrale idroelettrica Fioritella
- Stream section of the River Marta before (A) and after (B) the catchment canal of the Fioritella hydroelectric power station

Fioritella should have been between 0.2 and 0.8 m³/s, but the measurements taken on March 2005 showed an almost absent flow (Tab. 4). Moreover, this condition seems to be a not temporary situation, being the river bed strongly reduced between the power station catchment and the point of release compared to the natural state (Fig. 7). Similar conditions have been found at the other canals in the upper part of the River Marta. Concerning Centrale Traponzo, the flow rate measured on March 2005 is consistent with the instream flow. In this case, if a catchment of 1 m³/s is considered and if $Q_{7/10}$ is taken as upper limit of the instream flow, the streamflow becomes critical only in dry periods.

CONCLUSIONS

The hydrogeological layout of the upper basin of River Marta allowed the examination of the relation between surface and ground waters and the evaluation of the water resources.

It emerged that the streamflow is fed from groundwater, as well as from the effluent of the Lake Bolsena. The volcanic basal water-

qua, soprattutto nella parte terminale del bacino esaminato, è il recapito preferenziale della falda di base dell'acquifero vulcanico, essendo stato stimato il deflusso di base pari circa il 63% del deflusso totale medio annuo. Inoltre, dalla ricostruzione della morfologia piezometrica è evidente che il bacino superficiale non coincide esattamente con quello idrogeologico, essendo quest'ultimo relativamente più esteso per circa il 12%, ed è aperto in prossimità del lago a flussi in entrata per via sotterranea.

Sulla base di questi elementi è stata condotta una prima valutazione del bilancio idrologico su base media annua del bacino superficiale (circa 578 km²). L'entità complessiva delle risorse idriche del bacino è di circa 200×10⁶ m³/anno, ad esclusione degli efflussi dal Lago di Bolsena regolati artificialmente all'incile da paratoie. Delle risorse idriche complessive del bacino, circa il 51% è rappresentato dalle acque di infiltrazione efficace, circa il 30% è rappresentato da acque di ruscellamento superficiale e circa il 19% è costituito da apporti idrici sotterranei esterni al bacino superficiale. Le uscite di acqua dal sistema hanno recapito nel fiume direttamente (ruscellamento e acque sotterranee alimentanti il fiume) o indirettamente (scarico in alveo delle sorgenti captate e dei prelievi per uso potabile ed industriale); fanno eccezione i prelievi idrici ad uso irriguo (stimati in circa il 20% della potenzialità idrica complessiva) che rappresentano una reale perdita dal sistema, in quanto sopperiscono alla differenza tra evapotraspirazione potenziale e reale nel periodo irriguo.

La determinazione del deflusso minimo vitale del Fiume Marta, condotta su alcune sezioni significative interessate da derivazioni ed applicando più metodi basati principalmente sulla portata naturale del corso d'acqua, ha permesso di definire un intervallo di valori. In una delle sezioni esaminate il deflusso rilasciato in alveo nel 2005 è risultato decisamente inferiore all'intervallo di valori calcolato per il deflusso minimo vitale. Peraltro, se si fa riferimento ai risultati del bilancio idrologico, la portata naturale del fiume sulla quale è basata la determinazione dei deflussi minimi è già ridotta dai prelievi idrici dall'acquifero a scopo irriguo che vanno a sostenere la differenza tra evapotraspirazione potenziale e reale nel periodo irriguo. Infatti, in assenza di prelievi irrigui, dalla valutazione delle risorse idriche del bacino il deflusso sarebbe superiore di circa il 20%.

Quest'ultimo risultato evidenzia che, quando il fiume è alimentato dalla falda ed esistono prelievi dall'acquifero, la stima del DMV non si può basare solo su osservazioni e misure effettuate sul corso d'acqua. In questo caso, la portata in alveo è già diminuita dai prelievi dall'acquifero che sottraggono un'aliquota del deflusso di base del fiume. Pertanto l'analisi dei deflussi minimi dovrebbe considerare non solo l'entità delle derivazioni dirette dal fiume, ma anche tutti i prelievi che incidono sul sistema idrogeologico connesso con il corso d'acqua superficiale.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l'Ambito Territoriale Ottimale di Viterbo, nella persona dell'ing. Giancarlo Daniele, e l'Agenzia per la

table has its main discharge towards the river, especially in the lower part of the basin, in fact the river baseflow has been estimated as 63% of the mean annual overall streamflow. Furthermore, according to the reconstruction of the potentiometric surface, the drainage basin does not correspond to the hydrogeological basin, being the latter 12% more extended and open to groundwater inflow from the lake.

On the basis of the above, an average annual evaluation of the water budget of the basin (about 578 km²) points to an amount of water resources of about 200×10⁶ m³/year, excluding the outlet of the Lake Bolsena, controlled artificially by movable sluice gates. Considering the total water resources, 51% is constituted by effective infiltration, 30% by surface runoff and 19% by groundwater inflow from outside the watershed. The flow leaving the system discharges into the river directly (as runoff and baseflow) or indirectly (withdrawals for industrial and drinking purposes which are released in the river); an exception is made by the withdrawals for irrigation (about 20% of the overall water resources) which represent an actual water loss from the system supplying the difference between the potential and actual evapotranspiration in the dry period.

The determination of the instream flow of the River Marta, applied to some significant sections with different methods, lead to some ranges of values. In one of the sections examined, the streamflow rate in 2005 was definitely lower than the instream flow. Moreover, if the water budget results are considered, the natural river discharge is already lowered by the irrigation practice which fills the gap between potential and actual evapotranspiration. As a matter of fact, not considering the irrigation term, the evaluation of the basin water resources would increase by 20%.

This last statement highlights that, when the river is fed from groundwater, the evaluation of instream flow cannot be based only on measurements and investigation of the watercourse as such. In this case, the river flow is lowered by the withdrawals which diminishes the baseflow destined to the river. The analysis of the instream flow should thus consider all the impacts acting on the whole hydrogeological system and not only the direct catchments of the surface waters.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the ATO-1 Viterbo and the Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Territorio (APAT) for providing

Protezione dell'Ambiente e Territorio, nelle persone del dott. Claudio Campobasso e della dott.ssa Cristina Pompei, per i dati forniti. Gli autori desiderano ringraziare anche i due revisori anonimi, che con i loro commenti e suggerimenti hanno contribuito a migliorare il manoscritto.

Il lavoro è stato condotto con il contributo PRIN MIUR 2003 – prot. 2003 049442_002.

us with important data, especially dr. Claudio Campobasso, eng. Giancarlo Daniele and dr. Cristina Pompei. The authors also thank two anonymous reviewers for their constructive comments which contributed to the improvement of this manuscript.

The work was carried out with a contribution under PRIN MIUR 2003 – prot. 2003 049442_002.

OPERE CITATE / REFERENCES

- AMBROSETTI P., CARBONI M. G., CONTI M. A., COSTANTINI A., ESU D., GANDINI A., GIROTTI O., LAZZAROTTO A., MAZZANTI R., NICOSIA U., PARISI G. & SANDRELLI F. (1978) - *Evoluzione paleogeografica e tettonica nei bacini Tosco-Umbro-Laziali nel Pliocene e Pleistocene inferiore*. Mem. Soc. Geol. It., **19**: 573-580.
- ANDREANI P., MOTAWI A. & NASCETTI G. (1997) - *Valutazione della qualità delle acque del bacino idrografico del Fiume Marta (alto Lazio): analisi dell'Indice Biotico Esteso (IBE) e della frequenza relativa di rane verdi del complesso Rana Esculenta*. Atti del Convegno del VIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia, Parma 10-12 settembre 1997, 457-460.
- BAIOCCHI A. (2001) - *Lineamenti idrogeologici e problematiche di vulnerabilità all'inquinamento delle acque sotterranee del settore settentrionale del Distretto Cimino*. Tesi di laurea in Scienze Ambientali, Facoltà di Scienze MM. FF. NN., Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, 175 pp.
- BAIOCCHI A., DRAGONI W., LOTTI F., LUZZI G. & PISCOPO V. (2006) - *Outline of the hydrogeology of the Cimino and Vico volcanic area and of the interaction between groundwater and Lake Vico (Lazio Region, Central Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., **125**: 187-202.
- BALDI P., DECANDIA F. A., LAZZAROTTO A. & CALAMAI A. (1974) - *Studio geologico del substrato della copertura vulcanica laziale nella zona dei laghi di Bolsena, Vico e Bracciano*. Mem. Soc. Geol. It., **13**: 575-606.
- BERTAGNINI A. & SBRANA A. (1986) - *Il vulcano di Vico: stratigrafia del complesso vulcanico e sequenze eruttive delle formazioni piroclastiche*. Mem. Soc. Geol. It., **35**: 699-713.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**: 991-1012.
- BONO P. (1993) - *Risorse idriche*. Società Geologica Italiana, Guide Geologiche Regionali, **5**: 81-88.
- BORGHETTI G., SBRANA A. & SOLLEVANTI F. (1981) - *Vulcano tettonico dei monti Cimini e rapporti cronologici tra vulcanismo Cimino e Vicano*. Rend. Soc. Geol. It., **4**: 254-274.
- BOVEE K. D. (1982) - *A guide to stream habitat analysis using instream flow incremental methodology*. Instream Flow Information Paper 12, U.S.D.I. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, 82/26, 248 pp.
- BUONASORTE G., FIORDELISI A., PANDELI E., ROSSI U. & SOLLEVANTI F. (1987) - *Stratigraphic correlations and structural setting of the pre-neoautochthonous sedimentary sequences of Northern Latium*. Period. Mineral., **56**: 111-122.
- CALENDA G., MANCINI C. P. & MARCELLO A. (2000) - *Assessing instream flow needs for fish life in the regional basins of Regione Lazio, Italy*. In: Water Resources Management in a Vulnerable Environment for Sustainable Development, K. Andah ed., Grifo Publishers, Perugia, 167-183.
- CAPELLI G., MAZZA R. & GAZZETTI C. (2005) - *Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio: gli acquiferi vulcanici*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, **78**, Pitagora Editrice Bologna.
- CELICO P. (1988) - *Prospezioni idrogeologiche*. Vol. II, Ed. Liguori, Napoli.
- CHIOCCHINI U. & MADONNA S. (2003) - *La geologia della Provincia di Viterbo*. In "Atti della Giornata di Studio - Le risorse idriche del Viterbese: salvaguardia e sviluppo sostenibile", U. CHIOCCHINI et alii ed., Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, 7-86.
- CIVITA M. (2005) - *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Ed. Ambrosiana, Milano.
- COMMISSIONE EUROPEA (2000) - *Programma Europeo Corine, Coordination of Information of the Environment*. Sottoprogetto "Land Cover". Scala 1: 100.000.
- CROSA G., COTTA RAMUSINO M. & MARCHETTI R. (1988) - *Determinazione delle portate minime necessarie per la tutela della vita acquatica in corsi d'acqua soggetti a derivazioni o ritenute*. Acqua-Aria, **7**: 839-850.
- DE FELICE A. M. & DRAGONI W. (1991) - *Studio idrogeologico di un bacino sulla "Marnoso-Arenacea"*. Atti 1° Conv. Naz. Giov. Ricerc. Geol. Appl. 22-23 Ottobre 1991, Gargnano (BS), Ricerca Scientifica ed Educazione Permanente, Suppl. **93**: 347-356.
- DE RITA D. (1993) - *Il vulcanismo della Regione Lazio*. Società Geologica Italiana, Guide Geologiche Regionali, **5**: 50-64.
- FAZZINI P., GELMINI R., MANTOVANI M. P. & PELLEGRINI M. (1972) - *Geologia dei Monti della Tolfa (Lazio settentrionale; province di Viterbo e Roma)*. Mem. Soc. Geol. Ital., **11**: 65-144.
- LARDINI D. & NAPPI G. (1987) - *I cicli eruttivi del complesso vulcanico cimino*. Soc. It. Min. e Petrol., **42**: 141-153.
- LOCARDI E. (1965) - *Tipi di ignimbriti di magmi mediterranei. Le ignimbriti del vulcano di Vico*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., **72**: 55-173.
- MARTINI P., MANCIOLA P. & UBERTINI L. (1994) - *Significato del minimo deflusso vitale e sua determinazione per un corso d'acqua dell'Italia Centrale*. Idrotecnica, **2**: 79-91.
- MEYBOOM P. (1961) - *Estimating groundwater recharge from stream hydrographs*. J. Geophys. Res., **66**: 1203-1214.

INTERACTIONS BETWEEN GROUNDWATER AND RIVER MARTA (CENTRAL ITALY) AND PROBLEMS RELATED TO THE DEFINITION OF THE INSTREAM FLOW

- NAPPI G., ANTONELLI F., COLTORTI M., MILANI L., RENZULLI A. & SIENA F. (1998) - *Volcanological and petrological evolution of the Eastern Vulsini District, Central Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **87**: 211-232.
- NAPPI G., RENZULLI A., SANTI P. & GILLOT P. Y. (1995) - *Geological evolution and geochronology of the Vulsini Volcanic District (Central Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., **114**: 599-613.
- PENMAN H. L. (1948) - *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. London A., **193**: 120-145.
- PISCOPO V., BARBIERI M., MONETTI V., PAGANO G., PISTONI S., RUGGI E. & STANZIONE D. (2006) - *Hydrogeology of the thermal waters in Viterbo area, central Italy*. Hydrogeology Journal (in press).
- REGIONE LAZIO (1998) - *Disponibilità idriche superficiali e minimi vitali, Relazione Generale*. Autorità dei Bacini Regionali, Regione Lazio, Assessorato alle Opere e Reti di Servizi e Mobilità, Roma, 202 pp.
- REGIONE LAZIO (2003) - *La Rete Natura 2000 nel Lazio*. Ass. Ambiente, Dip. Territorio, Direzione Generale e Protezione Civile.
- ROCCHETTI I. (2005) - *L'alto corso del fiume Marta: idrogeologia e valutazione del deflusso minimo vitale*. Tesi di laurea in Scienze Ambientali, Facoltà di Scienze MM. FF. NN., Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, 180 pp.
- SANTORO M. (1994) - *Il minimo deflusso vitale*. Atti del Simposio l'Acqua e l'Ambiente, 19 Settembre 1994, Napoli, Idrotecnica, 6.
- SINGH K. P. & STALL J. B. (1974) - *Hydrology of 7-day 10 yr low flow*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, **100**: 1753-1771.
- SOLLEVANTI F. (1983) - *Geologic, volcanologic and tectonic setting of the Vico-Cimino area, Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **17**, 203-217.
- SPAGGIARI G. C., MASCAZZINI G., UBERTINI L., BOVEE K., FASSÒ C., CASADEI S., MANCIOLA P. G., PANINI G., VOLTOLINI C., GENTILI G., SALSI A., ROMANÒ A., SACCARDO I., MARINI P. P., GAETA C., PARASIEWICZ P., CELIO M., BARONI CEDRO P. & LAMOUROUX N. (1997) - *Deflusso minimo vitale. Metodi ed esperienze per un corretto utilizzo della risorsa idrica nel rispetto degli usi ambientali dei corsi d'acqua*. Atti del Convegno AGAC, 21 Marzo 1997, Reggio Emilia, 182 pp.
- TENNANT D.L. (1976) - *Instream flow regime for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources*. Fisheries, (Bethesda) **1** (4): 6-10.
- TURC L. (1954) - *Le bilan d'eau des sols. Relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Ann. Agron., **5**, 491-596; **6**: 5-131, Paris.
- UBERTINI L., MANCIOLA P. & CASADEI S. (1995) - *Valutazione del minimo vitale del bacino del fiume Tevere*. Genio Rurale, **6**: 66-72.
- VISMARA R., AZZELLINO A., BOSI R., GENTILI G., RENOLDI M. & TORRETTA V. (1999) - *Portata minima vitale dei fiumi: analisi delle problematiche, delle esperienze e delle proposte*. Rapporto prodotto per il Ministero dei Lavori Pubblici, Direzione Generale della Difesa del Suolo. Milano, 179 pp.

Received April 2006 - Accepted December 2007