

CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELLE SORGENTI D'ALTA QUOTA DELLA IDROSTRUTTURA DI MONTE CAMBIO (RIETI, ITALIA) ED INFLUENZA DEI PROCESSI METEO-CLIMATICI LOCALI SULLE PORTATE SORGIVE

HYDROGEOLOGICAL FEATURES OF HIGH-ALTITUDE SPRINGS OF THE CAMBIO MT. HYDROSTRUCTURE (RIETI, ITALY) AND LOCAL METEO-CLIMATIC EFFECTS ON THEIR DISCHARGE PROCESSES

MARCO AMANTI, GIOVANNI CONTE, MAURIZIO MARINO, LUCIO MARTARELLI, GENNARO MARIA MONTI, GUIDO MOTTERAN, PAOLO PERINI & ANGELANTONIO SILVI

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - Dipartimento Difesa del Suolo/Servizio Geologico d'Italia
Via Curtatone, 3 - 00185 Roma - Tel. +390650074516 - E-mail: giovanni.conte@isprambiente.it

RIASSUNTO

Sono state studiate le caratteristiche idrostrutturali di una porzione del sistema acquifero di Monte Cambio (Monti Reatini orientali) ed idrodinamiche di sorgenti sospese perenni di cui è disponibile la serie storica delle portate.

Le litologie affioranti sono riferibili alla Successione Umbro-Marchigiano-Sabina (sedimenti di bacino pelagico prevalentemente fini e ben stratificati) cui si intercalano potenti afflussi detritici. La struttura ha assetto sinforme, con ondulazioni, pieghe e faglie distensive minori. Faglie normali di maggiore importanza delimitano l'acquifero, ospitato nei terreni delle formazioni comprese tra Corniola e Maiolica, e portano tale successione a contatto con il Calcare Massiccio.

È stato effettuato un tentativo di calcolo di bilancio dell'idrostruttura, riscontrando un'eccedenza di aliquota destinata all'infiltrazione efficace di 600-750 mm/a (40-50 l/s di risorsa idrica), verosimilmente recapitata nell'acquifero regionale basale e/o verso altri sistemi acquiferi limitrofi.

Le analisi delle serie temporali di parametri climatici quali gli apporti meteorici (pioggia e neve) e la temperatura atmosferica, sono risultate utili sia per la comprensione della dinamica dei processi atmosferici pluriennali ed infrannuali, in relazione al loro effetto sul flusso sorgivo, sia come contributo all'indagine di caratterizzazione idrostrutturale del bacino di alimentazione delle sorgenti.

In particolare è stata testata la significatività statistica di una tendenza di lungo periodo, negativa per le piogge e positiva per la temperatura dagli anni '50 al 2006.

Applicando la formula empirica di Thornthwaite alla serie storica della temperatura sono stati ricavati e confrontati due modelli mensili di evapotraspirazione potenziale, uno dell'inizio e l'altro della fine della serie. È stato inoltre stimato il ritardo del segnale della risposta sorgiva agli eventi pluviometrici e l'effetto memoria del sistema idrodinamico locale. Tali risultati sono stati valutati avendo come riferimento i dati di letteratura riguardanti altre sorgenti.

È stata inoltre effettuata la correlazione incrociata tra le registrazioni della portata di alcune sorgenti sospese dell'idrostruttura di Monte Cambio e di quella basale di S. Angelo (idrostruttura di M. Terminillo) al fine di evidenziare eventuali sfasamenti nella risposta al medesimo evento pluviometrico, indicativi di differenti situazioni idrostrutturali.

Infine, dai dati disponibili sono stati ricavati i coefficienti di esaur-

ABSTRACT

This work is aimed at the hydrostructural characterisation of a portion of the Mt. Cambio aquifer system (eastern Reatini Mountains) and the hydrodynamic study of perennial suspended springs for which time series data on discharge are available.

The outcropping lithotypes belong to the Umbro-Marchigiano-Sabina Succession (pelagic basin sediments, mainly fine-grained and well-stratified), interfingered with detritic flows. A synform structure was identified, including associated undulations, minor folds and normal faults. More important normal faults delimit the aquifer, hosted in a succession ranging from the Corniola to Maiolica Formations, placing this succession in contact with the Calcare Massiccio Formation.

An attempt was made to calculate the hydrogeological budget for the hydrostructure, detecting an effective infiltration surplus of 600-750 mm/yr (40-50 l/s of groundwater resource). This resource is probably directed towards the regional basal aquifer and/or towards other adjoining aquifer systems.

Taking into account the Thornthwaite empirical formula and considering the temperature time series, two distinct models (referred to both the first and the last years of the series) for the monthly potential evapotranspiration were obtained and compared. Furthermore, both the time lag from the precipitation events to the corresponding increasing of the spring flow and the memory effect of the local hydrodynamic system were estimated. These results were also compared with the literature information regarding other significant springs.

The cross-correlation analysis among the flow time series of some perched springs of the Mt. Cambio hydrostructure and of the basal spring of S. Angelo (Mt. Terminillo hydrostructure) has been conducted in order to evidence possible differences among their feedback time to a same pluviometric event, likely reflecting the different hydrostructural settings.

The recession coefficients of some springs of the Monte Cambio hydrostructure have also been calculated.

The obtained information allowed us to describe the geological and hydrostructural features of the M. Cambio aquifer in the frame of the calcareous-marly Meso-Cenozoic succession of the

rimento delle curve di alcune sorgenti di M.Cambio.

Il presente studio ha permesso di inserire nel quadro litostratigrafico ed idrostrutturale dell'area di Monte Cambio, tipico delle successioni calcareo-marnose meso-cenozoiche dell'Appennino Umbro-Marchigiano-Sabino, i principali fattori condizionanti la dinamica delle falde idriche scaturiti dall'analisi delle serie storiche di portata sorgiva e dei processi evolutivi meteorologici locali.

TERMINI CHIAVE: *rilevamento geologico, idrogeologia, processi meteo-climatici, analisi di serie temporali, Monte Cambio, Rieti, Lazio*

INTRODUZIONE

L'area in esame, ubicata nel settore orientale dei Monti Reatini, tra il versante orientale del Monte Terminillo, quello meridionale del Monte Cambio e la profonda incisione di Valle Scura, è caratterizzata da un elevato numero di sorgenti perenni sospese di alta quota, alcune delle quali, pur avendo portate modeste, forniscono sin dagli anni '50 un contributo non trascurabile al sistema acquedottistico locale.

Oggetto del presente lavoro è lo studio congiunto delle caratteristiche idrostrutturali di una porzione dell'acquifero di M. Cambio, mediante l'uso di informazioni desunte dal rilevamento geologico e di alcune caratteristiche idrodinamiche ricavate dalle serie storiche delle portate sorgive e delle precipitazioni atmosferiche locali.

Le sorgenti della struttura idrogeologica di M.Cambio, malgrado producano volumi idrici modesti, con circuiti sotterranei di limitato sviluppo, risultano di particolare interesse, in quanto, essendo sospese ed ubicate in alta quota, rispondono agli apporti meteorici in modo più diretto e meno "filtrato" da fattori idrostrutturali rispetto alle sorgenti ubicate alla base dei rilievi. Pertanto, la disponibilità di registrazioni di portata sorgiva giornaliera e di serie storiche continue e di lungo periodo di pioggia, neve e temperatura atmosferica di una stazione meteorologica posta nelle vicinanze e circa alla stessa quota dell'area di alimentazione delle sorgenti, costituisce una circostanza favorevole e singolare nell'ambito delle sorgenti appenniniche.

Questo lavoro è stato reso possibile grazie alla collaborazione dell'Acquedotto Reatino che, oltre a mettere a disposizione le registrazioni della portata delle sorgenti di Porcini 1 e 2 e di Cavalli, attualmente in loro gestione, ha fornito varie indicazioni tecniche utili per l'interpretazione dei dati e ha permesso l'esame diretto della situazione geologica all'interno delle opere di presa.

Il Servizio Idrografico della Regione Lazio, da parte sua, ha fornito i dati delle serie temporali delle precipitazioni atmosferiche delle stazioni pluviometriche nell'area di interesse, di cui alcune attrezzate per la misura del manto nevoso.

PRINCIPALI ASPETTI GEOLOGICI

INQUADRAMENTO GEOLOGICO REGIONALE

L'area in studio (Fig. 1) appartiene all'unità strutturale dei Monti Sibillini, separata a sud-est dall'unità strutturale Gran Sasso-Cittareale tramite la linea di sovrascorrimento Olevano-Antrodoco-Posta-

Umbro-Marchean-Sabino Apennines, also considering the results derived from the study of both the spring flow time series at different time scales and the correlated local climatic evolutionary processes.

KEY WORDS: *geological survey, hydrogeology, meteo-climatic processes, analysis of time series, Monte di Cambio, Rieti, Lazio*

INTRODUCTION

The study area, situated in the eastern sector of the Reatini Mountains, between the east slope of Monte Terminillo, the south side of Monte di Cambio (Mt. Cambio) and the deep incision of the Scura Valley, is characterised by a high number of perennial high-altitude perched springs. Since the 1950s, some of these springs, although of modest discharge, have provided a significant contribution to the local water system.

The object of the present work is the study of both the hydrostructural and hydrodynamic characteristics of a portion of the Mt. Cambio aquifer system, using information derived from geological surveys and from time series data on spring discharge and local precipitation. The study leads to a characterisation of the aquifer system covering an area including the mountain formations from the west side of Monte Terminillo to the Velino River valley.

The springs of the Mt. Cambio hydrostructure, though they have moderate hydraulic discharge and relatively short underground pathways, are however interesting as they, representing perched and high-altitude springs, display a shorter and more direct (i.e. less influenced from hydrostructural effects) feedback to the meteoric events with respect to other springs sited at basal levels of the local relief. Nevertheless, the availability of both daily spring flow registrations and long and continuous time series of rainfall, snowfall and atmospheric temperature from a meteorological monitoring station located near and at about the same elevation of the recharge area of the springs, represents a favourable and singular situation for this Apennine sector.

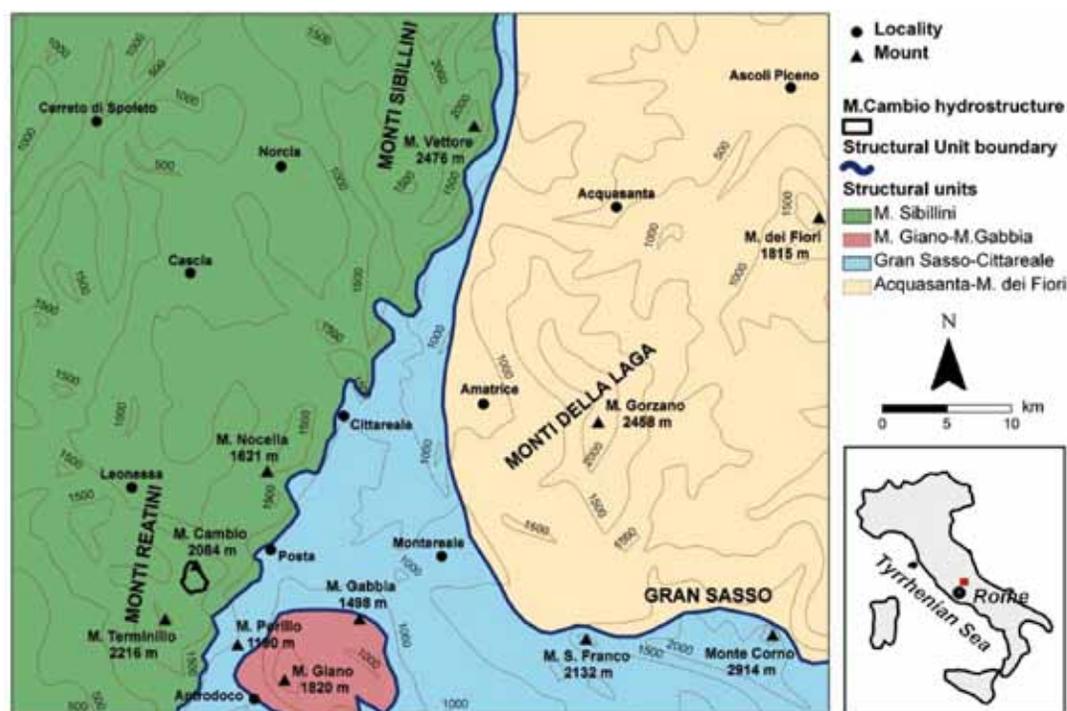
This work has been made possible thanks to the assistance of the Acquedotto Reatino, which provided documentation on discharge from the Cavalli and Porcini 1 and 2 springs, which are under its management, and useful suggestions for interpretation of the data, also permitting the geological survey within the intake site. The Servizio Idrografico of the Lazio Region provided time series data on atmospheric precipitation from 7 gauges in the study area, including some equipped for the measurement of snow depth.

MAIN GEOLOGICAL FEATURES

REGIONAL GEOLOGICAL SETTING

The study area (Fig. 1) falls within the regional structural unit of the Sibillini Mountains, which is separated from the Gran Sasso-Cittareale structural Unit to the southeast by the Olevano-

Fig. 1 - Carta d'inquadramento regionale geografico e strutturale dell'area di studio (nel riquadro la localizzazione dell'area nel contesto nazionale)
 - Geographical and structural sketch map at regional scale of the study area (inset shows context in Italy)



Monti Sibillini (direzione media N10-20°, in quest'area), che è parte della linea tettonica regionale Ancona-Anzio degli Autori (e.g.: OGNIBEN, 1969; DALLAN NARDI *et alii*, 1971; PAROTTO & PRATURLON, 1975; CASTELLARIN *et alii*, 1978).

L'unità strutturale dei Monti Sibillini è caratterizzata da un allineamento di rilievi con direzione N-S e morfologia netta che raggiungono quote superiori a 2000 m s.l.m. Le unità affioranti vanno dalla formazione del Calcere Massiccio (Giurassico inferiore *p.p.*) alle Marne con Cerrognia (Miocene *p.p.*) della Successione Umbro-Marchigiano-Sabina e al complesso marnoso-arenaceo neogenico di copertura, e corrispondono a facies deposizionali di piattaforma carbonatica, di scarpata e di bacino (e.g.: BIGI *et alii*, 1991; PIANA, 1995; DEIANA *et alii*, 1995; PIERANTONI *et alii*, 2005).

L'unità strutturale del Gran Sasso-Cittareale si estende lungo la direttrice appenninica (NW-SE), con quote che raggiungono circa i 1500 m s.l.m. in corrispondenza del settore nord-orientale della catena del Gran Sasso-Monte San Franco. Nel settore settentrionale di quest'area, al tetto della successione anzidetta, affiorano i sedimenti torbiditici pre-evaporitici della Formazione della Laga (Miocene superiore *p.p.*) (e.g.: GHISSETTI & VEZZANI, 1988; CAPOTORTI *et alii*, 1991; CENTAMORE *et alii*, 1991; PIANA, 1995).

ASSETTO GEOLITOLOGICO E STRUTTURALE

Le litologie affioranti nell'area (Fig. 2) sono quelle riferibili propriamente alla Successione Sabina (*sensu* PAROTTO & PRATURLON, 1975), caratterizzate da sedimenti di bacino pelagico, prevalentemente fini e ben stratificati, cui si intercalano potenti afflussi detritici in

Antrodoco-Posta-Mt.Sibillini overthrust alignment (average trend N10-20°, in this area), which is part of the Ancona-Anzio regional tectonic alignment, as described in the literature (e.g.: OGNIBEN, 1969; DALLAN NARDI *et alii*, 1971; PAROTTO & PRATURLON, 1975; CASTELLARIN *et alii*, 1978).

The Sibillini Mts. structural unit is characterised by N-S trending reliefs with sharp morphologies and elevations reaching over 2,000 m a.s.l. Outcropping formations span from the Calcere Massiccio (Lower Jurassic *p.p.*) to the Marne con Cerrognia (Miocene *p.p.*) of the Umbro-Marchigiano-Sabina Succession and its marly-arenaceous Neogenic cover, and are characterized by carbonatic platform passing to slope and marine basin environment deposits (e.g.: BIGI *et alii*, 1991; PIANA, 1995; DEIANA *et alii*, 1995; PIERANTONI *et alii*, 2005).

The Gran Sasso-Cittareale domain defines a long relief showing an Apenninic trend (NW-SE), with elevations reaching about 1500 m a.s.l. and constituting the north-westernmost sector of the Gran Sasso-Mt. San Franco chain; the northern sector of this area shows outcrops of pre-evaporitic terrigenous turbiditic deposits of the Laga Formation (Upper Miocene *p.p.*), on top of the previously defined succession. (e.g.: GHISSETTI & VEZZANI, 1988; CAPOTORTI *et alii*, 1991; CENTAMORE *et alii*, 1991; PIANA, 1995).

GEOLITHOLOGICAL AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS

The lithotype outcropping in the area (Fig. 2) are part of the Sabina Succession (*sensu* PAROTTO & PRATURLON, 1975), characterised by pelagic basin sediments, generally fine and well stratified, intercalated with massive canalized detritic flows. The aqui-

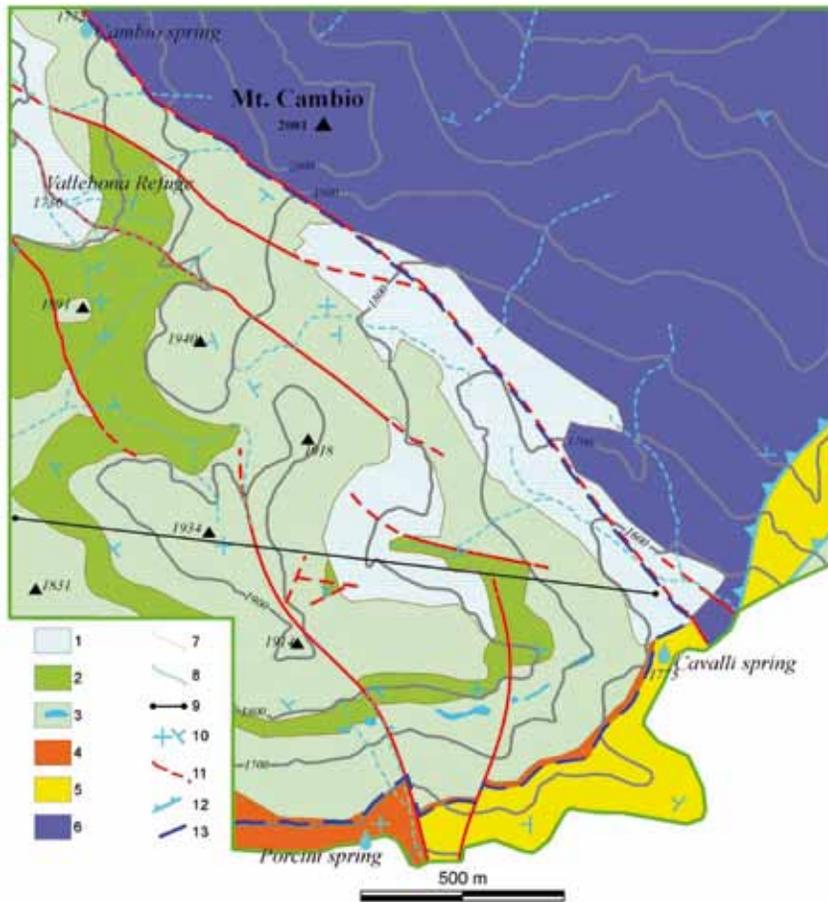


Fig. 2 - Carta geolitologica dell'area di studio. La sezione geolitologica (traccia lungo la linea verde) è riportata in Fig. 3. Legenda: 1. Depositi incoerenti a varia granulometria; 2. Selce e calcari selciferi stratificati, con subordinate intercalazioni di calcareniti; 3. Calcari micritici e calcareniti prevalenti, subordinati calcari marnosi, con intercalate biocalcareniti massive; 4. Argilliti prevalenti e marne; 5. Calcari micritici stratificati con noduli di selce e intercalate biocalcareniti massive; 6. Calcari massivi; 7. Curve di livello; 8. Reticolo idrografico; 9. Sezione geolitologica; 10. Giaciture: strati orizzontali e strati inclinati; 11. Faglie dirette (a tratteggio se incerte o sepolte); 12. Faglie inverse; 13. Limite dell'idrostruttura di Monte Cambio

- *Geolithological map of the study area (cross-section along the green line is shown in Figure 3). Legend: 1. Incoherent variable-sized deposits; 2. Stratified chert and cherty limestone, with minor intercalated biocalcarenites; 3. Predominantly micritic limestones and calcarenites, subordinate marly limestones, with intercalated massive biocalcarenites; 4. Prevailing shales and marls; 5. Stratified micritic limestones with chert nodules and intercalated massive biocalcarenites; 6. Massive limestones; 7. Elevation contour line; 8. Drainage network; 9. Geolithological cross-section; 10. Dip directions: horizontal beds and dipping beds; 11. Normal faults (dashed line: uncertain and buried faults); 12. Reverse faults; 13. Boundary of the Monte Cambio hydrostructure*

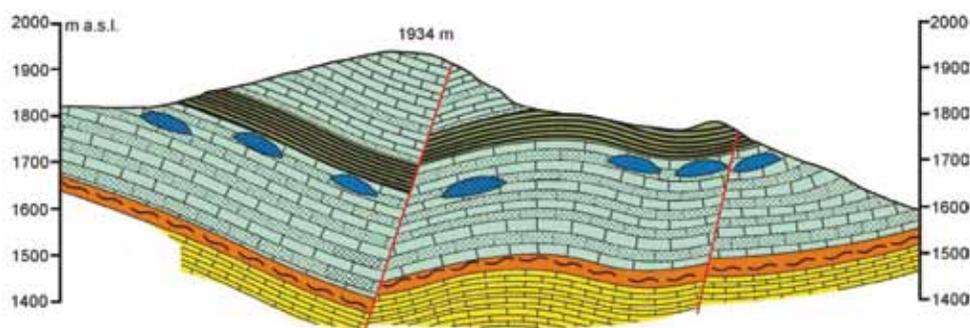
assetto massivo e canalizzato. L'acquifero interessa una successione sedimentaria stratificata calcareo-silico-marnosa ed a luoghi argillosa, in cui si riconoscono, dalla base verso l'alto:

- calcari massivi biancastri, fratturati e debolmente carsificati (Calccare Massiccio; Hettangiano-Pliensbachiano inferiore *p.p.*);
- calcari micritici in strati decimetrici con liste e noduli di selce e intercalazioni di calcari bioclastici in strati spessi e banchi (Corniola, Sinemuriano *p.p.*-Pliensbachiano, di cui affiora solo la parte sommitale);
- alternanza di argille giallastre-verdognole (prevalenti nella parte inferiore), calcari marnosi e calcareniti tipicamente arancioni anche oolitiche (Marne del Monte Serrone, spessore circa 80 m; Toarciano *p.p.*);
- calcari micritici biancastri con rare liste di selce (Calcari e Marne a Posidonia, spessore circa 200 m) caratterizzati da intercalazioni detritiche lentiformi plurimetriche (Toarciano superiore *p.p.*- Bajociano inferiore);
- fitte alternanze di sottili livelli diasprigni varicolori e calcari bioclastici (Calcari Diasprigni, spessore circa 70 m; Bajociano inferiore *p.p.*-Titoniano inferiore);
- calcari micritici bianchi regolarmente stratificati con liste e

fer is hosted in a stratified calcareous-siliceous-marly sedimentary succession with argillaceous zones, in which the following strata are seen, from lowest upwards:

- fractured and weakly karstified whitish massive limestones (Calccare Massiccio; Hettangian-Lower Pliensbachian *p.p.*);
- micritic limestones in decimetric strata with chert nodules and flattened nodules, thick intercalated strata and banks of bioclastic limestones (Corniola, Sinemurian *p.p.*-Pliensbachian, of which only the top of the formation outcrops);
- alternating yellowish-greenish clay (prevalent at lower levels), marly limestone and calcarenite, sometimes oolitic, usually orange in colour (Marne del Monte Serrone, thickness ca. 80 m; Toarcian *p.p.*);
- whitish micritic limestones with rare flattened chert nodules (Calcari e Marne a Posidonia, thickness ca. 200 m), characterised by plurimetric lenticular detritic intercalations (Upper Toarcian *p.p.*- Lower Bajocian *p.p.*);
- thick alternating strata of thin varicoloured jasper levels and bioclastic limestones (Calcari Diasprigni, thickness ca. 70 m; Lower Bajocian *p.p.*-Lower Titonian *p.p.*);
- regularly stratified white micritic limestones with chert nodules

Fig. 3 - Sezione geolitologica WNW-ESE dell'idrostruttura di M. Cambio (traccia della sezione e legenda in Fig. 2)
- WNW-ESE geolithologic cross-section of the Mt. Cambio hydrostructure (see Fig. 2 for context and legend)



noduli di selce prevalentemente grigia o nera e intercalazioni detritiche (Maiolica, Titoniano inferiore *p.p.*-Aptiano inferiore *p.p.*, di cui affiora solo la parte inferiore).

La successione mesozoica è ricoperta da depositi incoerenti di origine glaciale, fluvio-glaciale, di falda e di versante del Quaternario.

Dal punto di vista strutturale, è riconosciuto un assetto sinforme, cui sono associate ondulazioni e pieghe minori e faglie distensive con rigetti nell'ordine delle decine di metri (Fig. 3). Faglie normali, di maggiore importanza, delimitano l'acquifero, ponendo la successione stratificata a contatto con i più antichi calcari massivi del Calcare Massiccio.

Nell'ambito delle tipiche formazioni riconosciute nell'area sono state individuate 6 unità, descritte nella legenda di Figura 2, con omogeneo comportamento rispetto alla circolazione idrica.

PRINCIPALI ASPETTI IDROGEOLOGICI INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

I terreni affioranti nell'ambito dell'area di studio possono essere accorpati, in base alla loro permeabilità relativa e ad altre caratteristiche idrogeologiche (SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE, 1995), in un complesso idrogeologico calcareo (Giurassico inferiore-Cretacico superiore; potenza totale 1000-1500 m) con grado di permeabilità relativa alta, che comprende (dal basso verso l'alto): a) Complesso calcareo basale: formazioni calcaree con permeabilità secondaria elevata per fessurazione e carsismo, che ospitano un acquifero basale di rilevanza regionale (Calcare Massiccio e parte inferiore della Corniola); b) aquicludo basale: depositi marnosi e marnoso-calcarei, talora selciferi, con permeabilità relativamente bassa e limitata fessurazione, che hanno fondamentalmente un ruolo di *aquicludo* (parte superiore argillosa della Corniola, Marne del Monte Serrone, Calcari e Marne a Posidonia, Calcari Diasprigni); c) Complesso calcareo superiore: calcari micritici stratificati con permeabilità secondaria medio-alta per fessurazione e subordinatamente per carsismo, che possono ospitare acquiferi sospesi (Maiolica).

A livello regionale seguono (verso l'alto) i complessi idrogeologici, caratterizzati da grado di permeabilità relativa minore, di seguito elencati: complesso calcareo-marnoso (Marne a Fucoidi, Scaglia Bianca e Scaglia Rossa); complesso marnoso-calcareo e marnoso (Scaglia Cinerea, Bisciario, Marne con Cerrognna, Marne ad Orbulina); complesso dei flysch (Formazione della Laga); complesso conglomeratico-sabbioso e detritico e complesso delle alluvioni.

and flattened nodules, predominantly grey or black, and detritic intercalations (Maiolica, Lower Titonian *p.p.*-Lower Aptian *p.p.*, of which only the lower part of the formation is visible).

Quaternary incoherent glacial, fluvial-glacial, slope and talus deposits cover the Mesozoic succession.

The geological structure is synclinal in form, with associated undulations, minor folds and tension faults, with slip displacements in the tens of metres (Fig. 3). The aquifer is delimited by more important normal faults that place the stratified succession in contact with older massive limestones of the Calcare Massiccio.

The legend for Figure 2 describes 6 lithological units identified by the study, pertaining to the formations noted above, each having characteristic hydraulic circulation behaviour.

MAIN HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS HYDROGEOLOGICAL SETTING

The terrain outcropping in the study area may be distinguished, on the basis of relative hydraulic permeability and other hydrogeological features (SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE, 1995), in a calcareous hydrogeological complex (Lower Jurassic-Upper Cretaceous; total thickness 1000-1500 m) showing a high relative permeability degree and including (from bottom to top): a) Basal calcareous complex: calcareous formations with high secondary permeability, due to occurrence of fracturation and karst processes, and hosting a very productive regional basal aquifer at the Calcare Massiccio and lower part of the Corniola stratigraphic levels; b) basal aquiclude: marl and marly limestone, sometimes cherty, deposits having relatively low permeability and scarce fracturation degree and mainly *aquicludo* role (upper clayey Corniola, Marne del Monte Serrone, Calcari e Marne a Posidonia, Calcari Diasprigni); c) Upper calcareous complex: stratified fine grained limestone having secondary medium-high permeability due to fracturation and subordinately karst processes and hosting suspended aquifers (Maiolica).

At a regional level, hydrogeological complexes with less significant relative permeability degree follow (from lowest upwards): calcareous-marly complex (Marne a Fucoidi, Scaglia Bianca and Scaglia Rossa formations); marly-calcareous and marly complex (Scaglia Cinerea, Bisciario, Marne con Cerrognna, Marne ad Orbulina formations); flysch complex (Laga Formation); conglomeratic-sandy and detritic complex and alluvial complex.

ASSETTO IDROGEOLOGICO DELL'IDROSTRUTTURA DI MONTE CAMBIO

L'idrostruttura di M. Cambio, appartenente alla più ampia struttura idrogeologica di M. Terminillo, è limitata, nell'area di studio, ad E dalla struttura di M. Porillo (comprendente depositi marnoso-arenacei) e a N dalla struttura di M. Nocella (depositi calcareo-marnosi) ed è attraversata in superficie dallo spartiacque che divide due dei sottobacini idrografici del Fiume Tevere (fiumi Corno e Velino) (Fig. 4). Nel dettaglio, l'idrostruttura è caratterizzata dai depositi marnosi e marnoso-calcarei e dai calcari micritici del complesso idrogeologico calcareo precedentemente definito.

Acquiferi sospesi di alta quota sono piuttosto frequenti nel sistema orografico del M. Terminillo, a causa della variabile permeabilità idraulica dei differenti litotipi presenti nella successione sedimentaria locale, con i termini meno permeabili che svolgono funzione di aquitard o aquiclude. Nel caso specifico, infatti, l'acquifero individuato risulta essere sospeso sui termini argilloso-marnosi delle Marne del Monte Serrone. Nei calcari micritici ivi affioranti si conferma la presenza di modeste tracce di carsismo.

L'idrostruttura di Monte Cambio, ospitata principalmente nel complesso idrogeologico calcareo superiore, è limitata a NE da una linea tettonica diretta subverticale e a S e a W dall'aquicludo basale, presente, ma non affiorante, anche nell'estremità NW. L'area sottesa

HYDROGEOLOGICAL FEATURES OF THE MONTE CAMBIO HYDROSTRUCTURE

The Mt. Cambio hydrostructure is contained within the larger hydrogeological structure of Monte Terminillo, connecting with the regional basal aquifer, delimited in the study area by the Mt. Porillo structure (composed of marly-arenaceous deposits) at E and by the Mt. Nocella structure (calcareous-marly deposits) at N (Fig. 4). A watershed divide crosses the structure under study between two hydrographical sub-basins of the Tiber River (Corno and Velino rivers). It hosts suspended high-altitude aquifers, which are quite frequent in the Monte Terminillo orographic system due to variations in hydraulic permeability of the various lithotypes of the Umbria-Marche regional succession, in which less permeable units serve roles as aquitards or aquicludes. In the specific study area, the aquifer is suspended on clay-marly units present at the base of the Marne del Monte Serrone. The outcrops of the calcareous units of the succession show modest traces of karst processes.

The Mt. Cambio hydrostructure, mainly hosted in the Upper calcareous hydrogeological complex, is bordered at NE by a sub-vertical normal tectonic line and at S and W from the basal aquiclude; this latter occurs, but does not outcrop, also to the NW edge of the structure. The total surface of this structure has been evaluated in 2.2 km². The cited normal tectonic line is concerned by

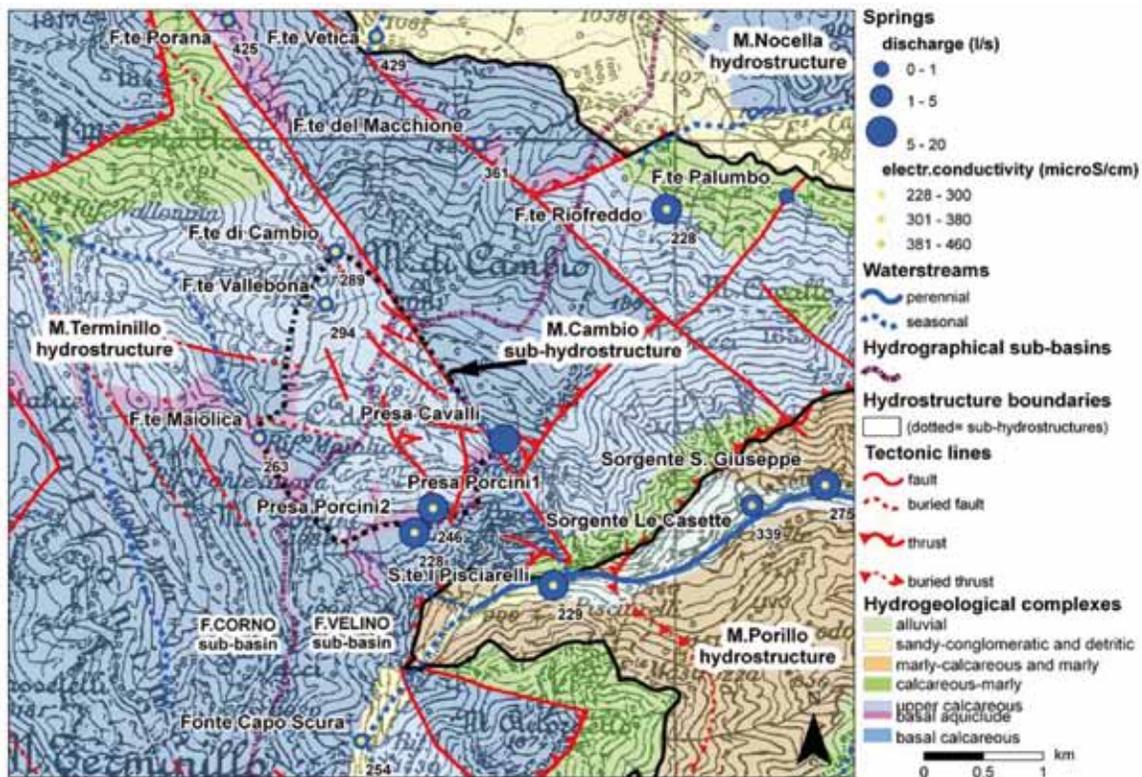


Fig. 4 - Schema idrogeologico dell'area di studio
- Hydrogeological sketch map of the study area

HYDROGEOLOGICAL FEATURES OF HIGH-ALTITUDE SPRINGS OF THE CAMBIO MT. HYDROSTRUCTURE (RIETI, ITALY) AND LOCAL METEO-CLIMATIC EFFECTS ON THEIR DISCHARGE PROCESSES

Tab. 1 - Principali caratteristiche delle sorgenti studiate. * Dati da studi precedenti (e.g., GIULIANO & SCIOTTI, 1981; BONI *et alii*, 1995)
- *Characteristics of the examined springs. * Data from previous studies (e.g., GIULIANO & SCIOTTI, 1981; BONI et alii, 1995)*

Spring	Altitude (m a.s.l.)	Type	Use	mean Q (l/s)	mean T (°C)	mean CE (µS/cm)	mean pH
Springs of the Mt. Cambio hydrostructure							
Presa Cavalli	1582	perennial	aqueduct	6*			
Presa Porcini I	1400	perennial	aqueduct	8	7	246	7.9
Presa Porcini II	1456	perennial	aqueduct	6	7	228	7.9
Fonte di Cambio	1775	perennial?	water trough/ fountain	0.1	10	289	
Fonte Vallebona	1736	perennial	water trough/ fountain	0.1	10	294	
Fonte Maiolica	1704	perennial	water trough/ fountain	0.5	10	263	7.5
Springs adjacent to the Mt. Cambio hydrostructure							
Sorgente S. Giuseppe	730	perennial	fountain	11.4	9	275	7.9
Fonte Capo Scura	1490	perennial?	cattle trough	0.02	8	254	8.4
Sorgente Le Casette	750	perennial	water trough/ fountain	1.2	9	339	8.0
Fonte Palumbo	1020	perennial	aqueduct	1*			
Fonte Riofreddo	1343	perennial	aqueduct	1	7	228	7.2
Fonte del Macchione	1423	perennial?	unutilised	0.01	11	361	7.1
Fonte Vetica	1037	perennial	aqueduct	1	8	429	7.3
Fonte Porana	1429	perennial	cattle trough	0.2	8	425	7.3

da tali limiti misura circa 2.2 km². Attraverso la suddetta linea tettonica è possibile avvengano processi di *drenance* dall'idrostruttura in studio verso l'aquifero basale, ospitato nel complesso calcareo basale.

Le sorgenti censite sono collocate prevalentemente in corrispondenza del tetto di formazioni marnose affioranti ai margini della struttura (Fig. 4) come sorgenti per soglia di permeabilità sottoposta, in una fascia altimetrica compresa tra quota 1600 e 1700 m s.l.m. Le portate di magra di quelle perenni non superano i 4 l/s, le maggiori hanno portata media tra 5-10 l/s e massima pari a circa 25-30 l/s, pertanto il loro regime è fortemente variabile con le stagioni. Alcune delle emergenze principali sono captate ad uso dell'Acquedotto Reatino (sorgenti Cavalli, Porcini 1 e 2).

A favore dell'ipotesi della unitarietà della struttura, i parametri chimico-fisici delle acque, misurati *in situ*, ricadono in intervalli ristretti (conducibilità elettrica specifica, CE, tra 228 e 294 µS/cm; temperature tra 7 e 10 °C; pH neutri o leggermente alcalini; tab.1). Altre sorgenti perenni, rinvenute nei settori marginali posti a NNE e SE della struttura di M. Cambio e probabilmente riferibili alla locale falda basale, sono state riportate in carta (Fig.4) ed in tabella 1. Si noti che tutte le sorgenti dell'idrostruttura di M. Cambio con portata media maggiore di 1 l/s (equivalenti al 97% del deflusso sorgivo dell'idrostruttura) contribuiscono ad alimentare la rete acquedottistica locale.

BILANCIO IDROGEOLOGICO

Sulla base della ricostruzione geologico-strutturale di figura 3 e delle informazioni desunte da un dettagliato censimento nel territorio di studio degli elementi d'interesse idrogeologico (e.g. sorgenti, corsi

drenance processes from the Mt. Cambio hydrostructure towards the basal aquifer, hosted in the Basal calcareous complex.

The springs are mainly located at top of marly formations cropping out at the margins of the structure (Fig. 4), can be classified as springs with permeability threshold underneath the aquifer and are situated at an altitude range of ca. 1600-1700 m a.s.l. The main springs have perennial characteristics and low-rate discharge less than 4 l/s, mean discharge of 5-10 l/s, and high-rate discharge of 25-30 l/s; then, their flow rate has greatly seasonal variations. Some of these springs are captured and used to feed the Reatino Aqueduct (Cavalli, Porcini 1 and 2).

As confirmation of the hypothesis of a single hydrogeological structure, *in situ* measurement of the chemical-physical characteristics of various springs showed a limited range, with specific electrical conductivity, CE, 228-294 µS/cm, temperature 7-10°C and pH neutral or slightly alkaline (Tab. 1). Other perennial springs, identified in the NNE and SE marginal sectors of the Mt. Cambio hydrostructure, and probably originating from the local basal water table, are also indicated on the map (Fig. 4) and in table 1. All springs of the Mt. Cambio structure with a mean discharge of more than 1 l/s, representing a total of 97% of the spring discharge of the hydrostructure, are captured to supply the local water system.

HYDROGEOLOGICAL BUDGET

An attempt was made to calculate the budget for the identified hydrostructure, on the basis of the geologic-structural reconstruction (Fig. 3) and information derived from a detailed survey of pertinent hydrogeo-

d'acqua; Fig. 4), è stato effettuato un tentativo di calcolo di bilancio idrogeologico dell'idrostruttura individuata. Sono stati pertanto considerati (Tab. 2): a) le precipitazioni (P), stimate in 1650 mm/anno in base ai dati delle stazioni pluvio-nivometriche dell'Ufficio Idrografico della Regione Lazio; b) l'evapotraspirazione reale calcolata mediante la formula di Turc, che è risultata circa 450 mm/anno (temperatura media annua di circa 6°C, dai dati delle suddette stazioni meteo-climatiche); c) il ruscellamento superficiale (R), stimato come percentuale degli apporti meteorici (da dati di letteratura per simili situazione geologiche in ambito regionale $R=15\%P$; BONI *et alii* 1986), che si attesta sui 250 mm/a. L'infiltrazione efficace calcolata in questo modo (metodo "indiretto" classico) è pari a 950 mm/a. Considerando il flusso idrico in uscita dalla struttura, dovuto alle emergenze sorgive (Presa Cavalli, Porcini 1 e 2, altre sorgenti minori), le portate misurate, calcolate e/o desumibili da varie fonti (e.g. GIULIANO & SCIOTTI, 1981; BONI *et alii*, 1995; Servizio gestione acquedotti Rieti) sono relativamente diverse, probabilmente per una loro sovra o sottostima, e cadono in un intervallo tra i 15 ed i 25 l/s. Tali valori corrispondono ad un'infiltrazione efficace calcolata compresa tra 215 e 360 mm/a (metodo "diretto" di BONI *et alii*, 1986; area di ricarica dell'acquifero circa 2,2 km²). In definitiva, si è riscontrata un'eccedenza di aliquota destinata all'infiltrazione efficace tra circa 610 e 735 mm/a, corrispondenti a circa 40-50 l/s di risorsa idrica. Si precisa che nelle analisi quantitative delle precipitazioni atmosferiche è stato adottato il principio affermato dalla WMO (World Meteorological Organization, 1983), secondo cui ad 1 cm di neve corrisponderebbe approssimativamente 1 mm di pioggia.

Tale risorsa è probabilmente recapitata, anche attraverso vie preferenziali (e.g.: le suddette faglie dirette che delimitano e/o sono presenti nella struttura), verso l'acquifero regionale basale residente nelle limitofe facies carbonatiche di piattaforma fratturate e carsificate e/o verso altri sistemi acquiferi, contribuendo alla portata delle sorgenti puntuali e lineari osservate in settori localizzati a più bassa quota sia a sud (e.g.: S. Giuseppe, Fonte Capo Scura, Le Casette, alveo del Torrente Scura) sia a nord (e.g.: Rio Freddo, Macchione, Vetica,

logic elements in the region (e.g. springs, watercourses; Fig. 4). The calculations considered the following factors (Tab. 2): a) precipitation (P), estimated at 1650 mm/yr, on the basis of data from rain and snow gauges of the Ufficio Idrografico della Regione Lazio (Annali Idrologici 1955-1999; communication from the Ufficio Idrografico della Regione Lazio regarding the period 2000-2006); b) actual evapotranspiration, calculated using the Turc formula as ca. 450 mm/yr (average annual temperature of 6°C, from data recorded by the Ufficio Idrografico della Regione Lazio; Annali Idrologici 1955-1999, communication from the Ufficio Idrografico della Regione Lazio regarding the period 2000-2006); c) surface runoff (R), estimated as a percentage of atmospheric precipitation ($R=15\%P$, from data in the literature on similar geological situations in the regional context, Boni *et alii* 1986) at ca. 250 mm/yr. The effective infiltration calculated from these data (conventional "indirect" methods) is 950 mm/yr. Considering the spring flow exiting the structure (Presa Cavalli, Porcini 1 and 2, other minor springs), the data, as measured, calculated, or derived from various sources (e.g. GIULIANO & SCIOTTI, 1981; BONI *et alii*, 1995; the management of the Rieti aqueducts), are quite varied, suggesting the occurrence of over and underestimates, but fall in a range from 15-25 l/s. These values correspond to an effective infiltration calculated at 215-360 mm/yr ("direct" method of BONI *et alii*, 1986; aquifer recharge area ca. 2.2 km²). The final result, comparing the two previously obtained values, was the identification of a surplus of effective infiltration of 600-750 mm/yr, corresponding to 40-50 l/s of groundwater resource. It is noteworthy that the snow to water equivalence has been estimated according to the WMO (World Meteorological Organization, 1983), assuming that 1 cm of snow corresponds to about 1 mm of rain.

This groundwater resource surplus is probably redirected, establishing a groundwater seepage process, along preferential routes (e.g.: the cited direct faults delimiting and/or present in the structure) towards the regional basal aquifer situated in the adjacent fractured and karstified carbonatic facies and/or towards other systems, contributing to discharge from point and linear springs observed in localized sectors at lower altitudes to the south (e.g.: S. Giuseppe, Fonte Capo Scura, Le

	mm/yr	l/s	km ²	°C	% of P
Precipitation (P) (calculated annual mean)	1650	115			
Temperature (calculated annual mean)				6	
Real evapotranspiration (calculated)	450	31			27
Runoff (calculated, estimated)	250	17			15
Effective infiltration (indirect method calculation)	950	67			58
Surface area (calculated)			2.2		
Spring discharge (measured/estimated, mean)		15-25			
Effective infiltration (direct method calculation)	215-360				14-22
Effective infiltration surplus (calculated)	600-750	40-50			36-44

Tab. 2 - Elementi del bilancio idrogeologico e delle risorse idriche disponibili nell'idrostruttura di Monte Cambio
- Aspects of hydrogeologic budget and groundwater resources in the Mt. Cambio structure

Porana) (Fig. 4). Sebbene lungo i percorsi idraulici la CE può variare, tale parametro è stato comunque utilizzato per avere indicazione sui recapiti della suddetta risorsa idrica, in considerazione dei relativamente brevi probabili percorsi, nonché degli omogenei valori di CE misurati mensilmente durante due anni idrologici di monitoraggio delle sorgenti nell'intorno dell'area di studio e delle loro marcate differenze rilevate tra sorgenti verosimilmente appartenenti a differenti idrostrutture. Pertanto, per i loro più simili valori di CE delle acque rispetto a quelli delle suddette sorgenti all'interno dell'idrostruttura di Monte Cambio (Fig. 4; Tab. 1), i recapiti più diretti sembrano essere le sorgenti Riofreddo, Capo Scura e S. Giuseppe.

CARATTERISTICHE DELLE SERIE STORICHE METEOCLIMATICHE E DI PORTATA SORGIVA

Le considerazioni di seguito esposte sono utili per la comprensione della dinamica dei processi atmosferici pluriennali ed infrannuali in relazione al loro effetto sul flusso sorgivo, per la definizione di modelli dinamici della portata delle sorgenti e per ottenere indicazioni indirette sulle caratteristiche idrostrutturali dei bacini di alimentazione.

Le serie temporali dei valori medi mensili ed annuali di piogge, disponibili dal 1955 al 2006, e di temperatura dal 1955 al 2002, della stazione meteorologica di M. Terminillo (1750 m s.l.m.; ANNALI IDROLOGICI, 1955-1999; comunicazione dell'Ufficio Idrografico della Regione Lazio, dati periodo 2000-2006) sono state esaminate al fine di verificare la presenza al loro interno di una componente tendenziale di lungo periodo. In particolare è stata testata l'ipotesi nulla di assenza di *trend* con il metodo statistico *Mann-Kendall* (Fig. 5; SEN, 1968; GERSTENGARBE & WERNER, 1999) ed in entrambi i casi l'ipotesi è stata rifiutata. I valori mensili delle piogge presentano una tendenza debolmente negativa con un *p-value* (*livello di probabilità*) pari a 0,02 e con un tasso di variazione di -0,7 mm/anno. Nelle serie delle temperature medie mensili invece si evidenzia un *trend* positivo piuttosto marcato con *p-value* pari a $8,9 \cdot 10^{-5}$ ed un tasso di variazione di 0,04°C/anno. Le precipitazioni nevose non mostrano una tendenza di fondo, essendo i dati mensili nivometrici (spessore del manto nevoso) eccessivamente dispersi intorno alla media.

Dopo avere definito la componente tendenziale delle serie temporali, vengono esaminate le caratteristiche dinamiche di queste ultime legate alla stagionalità.

Vi sono molti metodi in grado di estrarre la componente stagionale dalle serie storiche. Nel caso in esame è stata utilizzata la regressione lineare basata sulle variabili ausiliarie dicotomiche (variabili *dummy*; DAGUM, 2002) su serie di valori di registrazione aggregati mensilmente, in cui si stimano i coefficienti stagionali (per ciascun mese) necessari per la formulazione di una funzione periodica che rappresenti il modello stagionale del fenomeno in esame. Questo metodo offre la particolare opportunità di valutare il livello di stagionalità della serie tramite il coefficiente di determinazione R^2 . Nel caso in questione tale coefficiente, essendo per definizione una misura del grado di adattamento di modelli di regressione lineare ai dati osservati (i valori possibili sono compresi tra 0 e 1, ossia da nessuna alla

Casette, Torrente Scura stream) and north (e.g.: Rio Freddo, Macchione, Vetica, Porana) (Fig. 4). Though along hydraulic pathways the CE may progressively change, this parameter has however been used for having indications on the final delivery of the cited groundwater resource surplus, taking into consideration (i) the relatively short pathways, (ii) the homogeneity of the measured CE values obtained during two years of monthly spring monitoring in the neighbouring of the study area and (iii) the relatively marked CE differences among springs likely related to different hydrostructures. Consequently, the close similarity in observed CE values (Fig. 4; Tab. 1) suggests that the most probable direct hydraulic connections are with the Riofreddo, Capo Scura and S. Giuseppe springs.

CHARACTERISTICS OF METEOCLIMATIC AND SPRING FLOW TIME SERIES DATA

The following discussion is aimed contributing to the understanding of the pluriannual and infra-annual effects of the climatic process dynamics on the spring flow rate, to the definition of spring flow dynamic models and to the indirect hydrostructural characterization of the spring recharge area.

The time series regarding monthly and annual mean values of meteorological precipitation, available from 1955 to 2006, and of atmospheric temperature (1955-2002) at the meteorological station of Mt. Terminillo (1750 m a.s.l.; ANNALI IDROLOGICI, 1955-1999; communication from the Ufficio Idrografico della Regione Lazio regarding the period 2000-2006) have been analysed for the identification of a long time trend component. In particular, the assumption of a null hypothesis of absence of trend was tested by the *Mann-Kendall* statistic method (Fig. 5; SEN, 1968; GERSTENGARBE & WERNER, 1999) and in both verifications the hypothesis was rejected. The monthly values of precipitations show a slightly negative trend, revealed by a *p-value* (*probability value*) of 0.2 and a variation rate of -0.7 mm/year. In the monthly mean temperature series is instead showed a relatively sharp positive *trend*, according to a *p-value* of $8,9 \cdot 10^{-5}$ and a variation rate of 0,04°C/year. On the contrary, the snowfall data do not show any general trend, as the monthly snow depth values are too scattered with respect to their average value.

After having defined the trend component of the time series, their dynamic characteristics will be considered on seasonal terms.

There are many methods able to extract the seasonal component from the time series. In the case in exam has been used the linear regression based on the dichotomy auxiliary variables (*dummy* variables; DAGUM, 2002) of monthly aggregated data series, which allow the estimation of the seasonality indexes (for each month) aimed to the definition of a periodic function, representing the seasonality model of the studied process.

This method offers a particular opportunity to estimate the level of seasonality of the time series through the determination of coefficient values R^2 . In the case studied such coefficient being by definition a measure of adaptation degree of linear regression models to the observed values (possible variation from 0 to 1, i.e.

massima corrispondenza), può essere interpretato come una misura del livello di stagionalità delle serie temporali e costituisce un termine quantitativo di confronto della stagionalità presente nelle serie temporali di differenti parametri fisici.

I coefficienti di determinazione ottenuti dai modelli stagionali di pioggia, acqua di fusione della neve e portata sorgiva di Presa Cavalli, con intervallo temporale compreso dal 1998 al 2002, sono pari rispettivamente a 0,12, 0,65 e 0,73. La stagionalità delle piogge è quindi molto bassa ed è determinata essenzialmente dal periodo secco estivo. Resta tuttavia il dubbio di quanto tale modello possa rispecchiare l'effettivo contributo alle falde, considerata l'importanza del fenomeno dell'evapotraspirazione. Per ottenere un modello stagionale degli apporti alle falde maggiormente congruente con la componente efficace delle piogge è stata stimata l'evapotraspirazione potenziale con la formula empirica di Thornthwaite e rielaborato il modello stesso dopo avere sottratto ai valori mensili delle registrazioni pluviometriche l'evapotraspirazione potenziale. In figura 6a è riportato un modello stagionale di evapotraspirazione potenziale ricavato sulla base dei dati termometrici della stazione del Terminillo dal 1998 al 2002 (non sono disponibili registrazioni più recenti) e, per confronto, un secondo modello dal 1955 al 1964. Il modello di stagionalità della pioggia rielaborato, rivela un incremento di "R²" da 0,12 a 0,31. In figura 6b vengono posti a confronto il modello stagionale originale con quello rielaborato.

Per una conferma della maggiore adeguatezza del modello stagionale rielaborato nella descrizione gli apporti piovosi efficaci si è ricorso al confronto dei cross-correlogrammi (FRASCA, 2009) altezza pioggia / portata sorgiva utilizzando, in un caso, i dati di altezza di pioggia mensile originali e nell'altro quelli rielaborati.

Come illustrato in figura 8 il picco di correlazione presenta nel secondo caso un valore più elevato a conferma del rilevante effetto dell'evapotraspirazione sull'apporto idrico alla falda e sul regime delle sorgenti di Monte Cambio.

Malgrado l'evapotraspirazione aumenti il livello di stagionalità degli apporti piovosi, rendendo spesso trascurabile il loro contributo alle falde idriche nei mesi estivi, resta assai più marcata la stagionalità dei fenomeni legati alla neve (precipitazione, accumulo e fusione). L'insieme dei due processi stagionali atmosferici determina a sua volta, nel corso di ogni ciclo annuale, la forte stagionalità della portata sorgiva. Quest'ultima si manifesta graficamente nella componente dinamica dell'idrogramma di figura 7 (ovvero nella portata eccedente il livello medio annuale dei minimi mensili). Il volume di acqua riferibile a tale componente dinamica (volume stagionale "dinamico") è stato riportato in tabella 3 con i valori stagionali di acqua di fusione della neve e di altezza di pioggia corretti rispetto all'evapotraspirazione potenziale. Per quanto riguarda il contributo annuale alla falda, l'apporto medio della neve è pari al 26% del totale, il resto ovviamente è da attribuire alle piogge, mentre il volume annuale dovuto alla sola componente dinamica della portata idrica corrisponde al 22% del volume totale, pari alla percentuale dell'intero apporto medio delle acque di fusione delle nevi.

null to maximum adaptation), can be interpreted as a measure of the seasonality degree of the time series. Moreover R² establishes a quantity of comparison of the seasonality contained in the time series of the different physical parameters.

The determination coefficients calculated from the seasonal rainfall, snowmelt and Presa Cavalli intake discharge models (years 1998 to 2002) are 0.12, 0.65, 0.73, respectively. For the sake of brevity the graphical and analytical treatment of the seasonality models will be omitted. The seasonality of the rainfall is thus very low and is essentially determined by the dry summer period. Nevertheless remains the doubt about how much such model can reflect the real contribution to the stratum considered the importance of the phenomenon of evapotranspiration. To obtain a more representative model of the seasonal rainfall was carried out as follows: the potential evapotranspiration has been calculated according the Thornthwaite empirical formula. The seasonal pattern was then revised after withdrawing the component attributable to potential evapotranspiration from the values of monthly rainfall.

Figure 6a shows the comparison between the seasonal potential evapotranspiration models deriving from the air temperature data measured at the Mt. Terminillo meteorological station during the two periods 1998-2002 (more recent information is not available) and 1955-1964. The revised seasonality pattern reveals an increasing of R² values from 0.12 to 0.31. In figure 6b the original seasonality pattern will be compared with the revised one.

To confirm the major adequacy of the revised seasonality pattern of the effective rainfall, the cross-correlogrammi (FRASCA, 2009) height/intake discharge was compared using, in one case, the original monthly rainfall values and the recalculated in the other.

As shown in figure 8 the peak correlation is higher in the second case. This confirms the relevant effect of the evapotranspiration to the aquifer annual recharge and to the regime of the sources of Monte Cambio.

Though the evapotranspiration triggers a higher seasonality to the rainfall process, often leading to a negligible aquifer recharge during summer time, the seasonality of the snow process (fall, deposition and melting) is still comparatively higher. The seasonality of both the former atmospheric precipitation induces, in turn during each annual cycle, the strong seasonality of the spring discharge, clearly evident from the dynamic component (the flow exceeding the annual mean level of the monthly minimum values) of the hydrogram in figure 7. The water volume referred to this dynamic component is reported in table 3 (seasonal dynamic budget), as well as the cumulated snowmelt and rainfall seasonal values, after the appliance of potential evaporation correction. Regarding the aquifer annual recharge, the mean contribution from snowfall corresponds with about 26% of total volume, while the remaining 74% is due to the rainfall. The annual volume correlated to the dynamic component of the spring discharge is about 22%, in good agreement with the percentage of the mean snowmelt contribution.

HYDROGEOLOGICAL FEATURES OF HIGH-ALTITUDE SPRINGS OF THE CAMBIO MT. HYDROSTRUCTURE (RIETI, ITALY) AND LOCAL METEO-CLIMATIC EFFECTS ON THEIR DISCHARGE PROCESSES

L'insieme dei risultati ottenuti dall'analisi delle serie storiche indica che, se da un lato l'alimentazione delle sorgenti d'alta quota di M. Cambio è dovuta principalmente alle piogge (sufficienti a garantire il carattere perenne di presa Cavalli), d'altra parte il loro regime è fortemente condizionato dal ciclo annuale delle nevi. Inoltre il fenomeno dell'evapotraspirazione è significativamente in aumento con tasso di variazione dipendente dal *trend* della temperatura atmosferica già esaminato.

As a whole, the time series analysis indicates that the high-elevation springs of the Mt. Cambio hydrostructure are mainly hydraulically dependent from the rainfall (that are also enough abundant to grant a perennial characteristic to the Cavalli intake and other major springs), but their flow rate is strongly dependent from the snow annual cycle. Moreover, the phenomenon of evapotranspiration is increasing significantly in the studied time series as a consequence of the variation rate depending from the mentioned atmospheric temperatures.

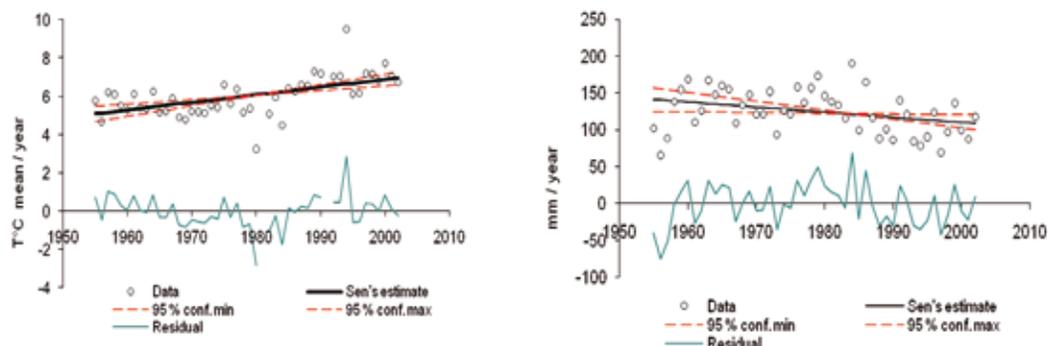


Fig. 5 - Grafici di tendenza delle medie annuali di temperatura e degli apporti annuali di pioggia della stazione meteo di M.Terminillo (1750 m s.l.m.). Modello elaborato con metodo Mann-Kendall-Sen's estimate slope (SEN, 1968; GERSTENGARBE & WERNER, 1999)
 - *Tendency charts of air temperature and rainfall annual mean values measured at the meteorological station of Mt. Terminillo (1750 m a.s.l.). The model has been obtained according to Mann-Kendall-Sen's estimate slope method (SEN, 1968; GERSTENGARBE & WERNER, 1999)*

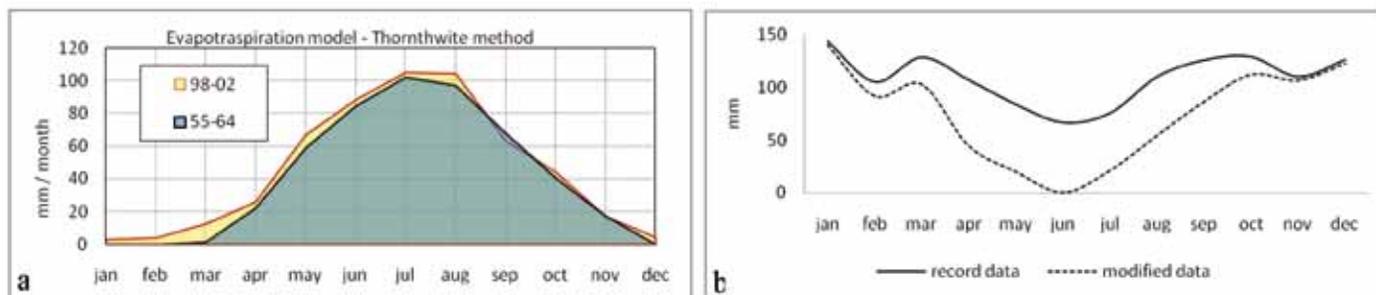
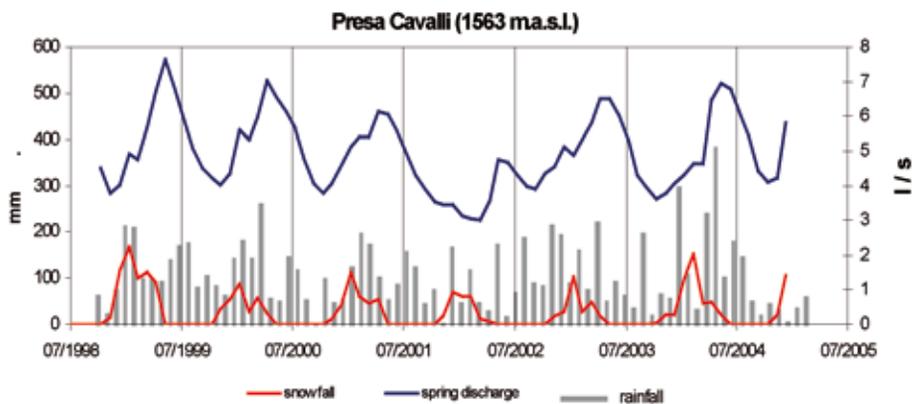


Fig. 6 - a) Modelli annuali di evapotraspirazione potenziale dei periodi 1955-1964 e 1998-2002 nella stazione di M.Terminillo (1750 m s.l.m.). Il confronto tra i due periodi evidenzia un incremento del 9% sul ciclo annuale. b) Confronto tra modello stagionale normale delle piogge e modello modificato rispetto all'effetto potenziale dell'evapotraspirazione
 - *a) Annual potential evapotranspiration models (reference periods 1955-1964 and 1998-2002) concerning the data of the meteorological station of Mt. Terminillo (1750 m a.s.l.). An increasing of about 9% with time, concerning annual cycles, has been evidenced. b) Comparison of the normal seasonal model of the rainfall and the model recalculated in relation to the potential effect of the evapotranspiration*

Fig. 7 - Idrogramma della Presa Cavalli (medie mensili 1998-2004) e precipitazioni atmosferiche nello stesso periodo (totali mensili)
 - *Hydrogram of Cavalli spring intake (monthly average values 1998-2004) and atmospheric precipitation for the same period (total monthly values)*



**CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELLE SORGENTI D'ALTA QUOTA DELLA IDROSTRUTTURA DI MONTE CAMBIO (RIETI, ITALIA)
ED INFLUENZA DEI PROCESSI METEO-CLIMATICI LOCALI SULLE PORTATE SORGIVE**

Cavalli intake	rainfall (mm)				snowmelt (mm)				seasonal dynamic budget (m ³)			
	Year	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer
1999	396.9	176.4	74.5	524.5	213.2	174.8	0.0	40.0	39741	55321	41188	33353
2000	245.9	87.1	4.6	426.3	129.8	14.1	0.0	30.5	44286	51608	38529	32938
2001	233.2	190.6	114.2	157.7	159.4	64.9	0.0	49.2	41244	46570	34920	27593
2002	196.3	170.5	266.0	262.2	91.6	20.3	0.0	9.6	23812	34140	32264	37165
2003	345.5	148.4	0.0	378.7	88.5	56.3	0.0	21.9	41461	49739	35880	30287
2004	705.7	232.7	0.0	79.2	111.8	111.3	0.0	12.6	35549	52905	42138	37421
mean	353.9	167.6	76.6	304.8	132.4	73.6	0.0	27.3	37682	48381	37486	33126
% year	39.2	18.6	8.5	33.8	56.7	31.6	0.0	11.7	24	31	24	21

Tab. 3 - Quadro riassuntivo degli apporti meteorici differenziati tra pioggia ed acqua di fusione della neve e del volume di acqua registrato a Presa Cavalli, relativi a ciascuna stagione di 6 cicli idrologici annuali consecutivi (1999-2004)

- Table showing the meteorological precipitation, expressed as the differentiated contribution due to rainfall and snowmelt and the seasonal dynamic water budget, regarding the Cavalli intake and concerning each season of 6 consecutive annual hydrologic cycles (1999-2004)

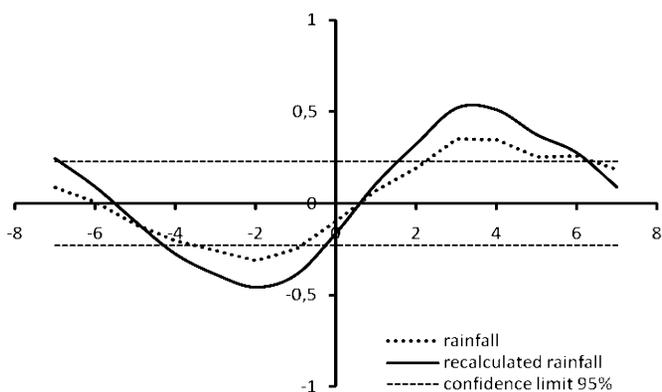


Fig. 8 - Cross-correlazioni a confronto tra medie mensili di portata sorgiva di presa Cavalli e totale mensile piogge. La cross-correlazione, nella teoria dei segnali (e.g. FRASCA, 2009), è una misura delle relazioni lineari tra le variabili di due processi temporali. Viene utilizzata, anche in idrogeologia (e.g. MANGIN, 1984), per individuare lo sfasamento temporale tra due processi, ad esempio tra gli apporti meteorici e la risposta sorgiva

- Cross-correlation plot among monthly data of spring discharge and precipitation of Cavalli intake. In the signal theory (e.g. FRASCA, 2009) the cross-correlation evidences the linear relationships among the variables of two time dependent processes. It is used, also in hydrogeology (e.g. MANGIN, 1984), for the definition of the time lag between two processes (e.g. the meteorological precipitation and the consequent increasing of the spring flow)

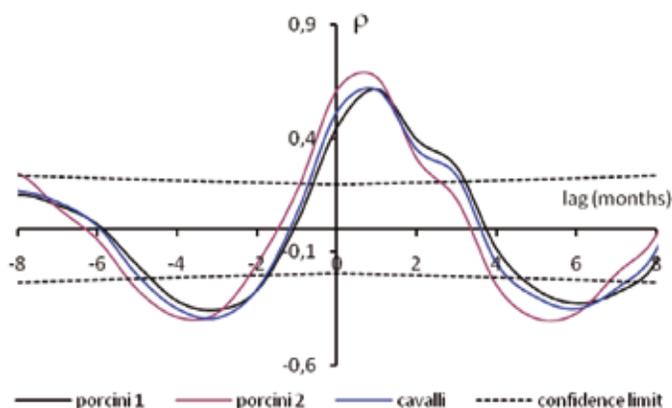


Fig. 9 - Cross-correlogramma delle serie storiche (1955-1957) delle tre sorgenti della idrostruttura di M. Cambio rispetto alla serie della sorgente di S. Angelo, appartenente ad altro sistema acquifero

- Time series data (1955-1957) cross-correlogram of the three springs of the M. Cambio hydrostructure in comparison with the series of S. Angelo Spring, related to a different aquifer system

CENNI SULLE RELAZIONI ESISTENTI TRA IDROSTRUTTURA E REGIME DI PORTATA

Non è stato possibile confrontare il regime delle sorgenti d'alta quota di M.Cambio con quello di sorgenti limitrofe alimentate dalla falda di base dell'idrostruttura di Monte Terminillo non essendo queste ultime monitorate in continuo. Un confronto invece è stato possibile tra le serie storiche di portata media mensile di alcune sorgenti della struttura di

REMARKSONTHE RELATIONSHIPS BETWEEN HYDROSTRUCTURE FEATURES AND SPRING FLOW RATE

It was not possible to compare the flow rate of the high-altitude springs of the Mt. Cambio hydrostructure with that of adjacent springs connected to the basal aquifer of the Mt. Terminillo hydrostructure, since these latter are not monitored.

An indirect comparison was then carried out on the discharge time

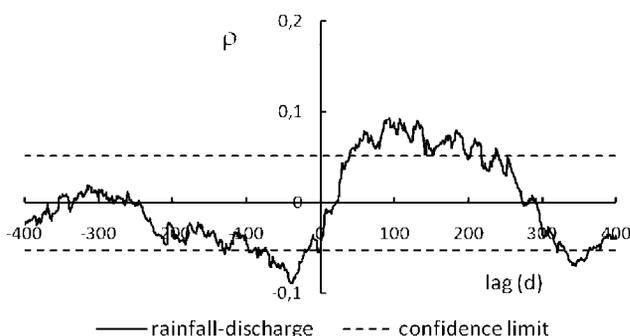


Fig. 10 - Cross-correlazione tra dati di portata sorgiva giornaliera di presa Cavalli ed altezza di pioggia giornaliera
 - Cross-correlation plot among daily data of spring discharge and precipitation of Cavalli intake

M. Cambio (Porcini 1, Porcini 2 e Cavalli) con quella della sorgente di S. Angelo (980 m s.l.m.), appartenente all'idrostruttura di M. Terminillo, ma alimentata dall'acquifero della dorsale di M. Ritornello (1874 m s.l.m.) - M. Elefante (2015 m s.l.m.). Tale sorgente è separata dal rilievo di M. Cambio, a sud, dall'incisione di Vallescura ed è ubicata alla base della dorsale suddetta. Le serie disponibili interessano un periodo di registrazione lontano essendo risalente ai tre anni idrologici 1953-1955.

La stazione pluviometrica del Terminillo (1750 m s.l.m.), circa equidistante e situata ad una quota prossima a quella delle due aree di alimentazione, può ritenersi significativa degli apporti atmosferici a scala mensile che interessano sia l'acquifero di S. Angelo che quello di M. Cambio.

Il massimo valore di correlazione ($\rho = 0,7$), ricavato mediante la correlazione incrociata fra ciascuna delle tre serie temporali delle sorgenti di M. Cambio rispetto alla serie della sorgente S. Angelo, corrisponde ad un ritardo di circa un mese (Fig. 9). A fronte di apporti meteorici stagionali comuni nelle due aree di alimentazione, il ritardo della risposta a livello della sorgente di S. Angelo rispetto a quello delle sorgenti di alta quota di M. Cambio si spiega ragionevolmente con il maggiore sviluppo dei circuiti idrici sotterranei che alimentano la sorgente S. Angelo.

Il cross-correlogramma giornaliero pioggia/portata sorgiva (Fig. 10) mostra una risposta significativa dopo 38 giorni con un massimo compreso tra 60 e 70 giorni. Tale dato fornisce un'idea più chiara delle caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero se confrontato con quello di altre sorgenti, come la sorgente di Scirca, in Umbria, appartenente ad una successione litologica della stessa facies di M. Cambio (umbro-marchigiana), caratterizzata da un serbatoio idrico carsificato nei livelli carbonatici del complesso calcareo basale. Qui la risposta è fortemente impulsiva essendo significativamente rilevabile a "ritardo zero", con un valore di picco della portata che si manifesta dopo circa 20 giorni (ANGELINI, 1997).

In figura 11 viene riportato il correlogramma dei dati giornalieri di portata di presa Cavalli registrati tra il 1998 ed il 2004. A differenza del cross-correlogramma, dove viene rappresentata la relazione bivariata delle serie temporali di pioggia e portata e stimato il coefficiente di

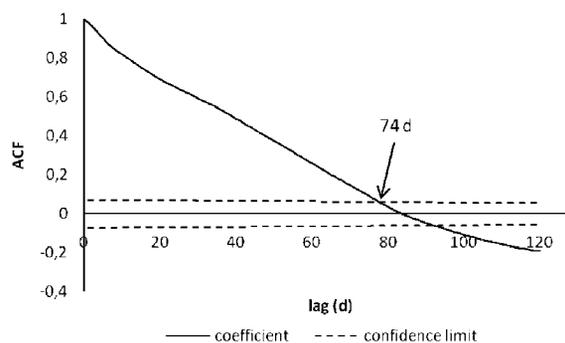


Fig. 11 - Correlogramma della portata di presa Cavalli. Dati giornalieri dal 1998 al 2004
 - Correlogram of the Cavalli intake discharge. Daily data from 1998 to 2004

series among some springs of the Mt. Cambio hydrostructure (Porcini 1, Porcini 2 e Cavalli) and that of the S. Angelo spring (980 m a.s.l.), as well related to the Mt. Terminillo hydrostructure, but fed by the basal aquifer of the Mt. Ritornello (1874 m a.s.l.)-Mt. Elefante (2015 m a.s.l.) ridge. This latter spring is located southwards to the Mt. Cambio relief, on the opposite side of the Vallescura Valley. These time series refers to a far reference time interval (1953-55 hydrological years).

The pluviometric station of Mt. Terminillo (1750 m a.s.l.) is roughly situated at the same reciprocal distance and in the same altitude range as the recharge areas of those springs and thus is considered to be representative of the monthly precipitation amounts of both the aquifers which the Mt. Cambio and S. Angelo springs are linked to.

The maximum correlation index value ($\rho = 0,7$), obtained by cross-correlation method for the spring discharge/precipitation model among each of the three time series of the Mt. Cambio springs with respect to the series of the S. Angelo spring, indicates a feedback delay of about one month (Fig. 9). Since the seasonal precipitations for unit surface are considered to be similar in the two recharge areas, the delayed feedback signal for the S. Angelo basal spring with respect to the other Mt. Cambio high-altitude springs is likely due to the longer travel distance of the groundwater pathways feeding the S. Angelo spring.

The cross-correlogram of figure 10 (significant spring discharge feedback signal after 38 days and maximum discharge at 60-70 days from the precipitation event) allow us to have indications on the hydrodynamic features of the Mt. Cambio aquifer in comparison with those of the Scirca spring, in the neighbouring southern Umbria region. This latter spring is related to the same Umbro-Marchean stratigraphical succession as the Mt. Cambio spring, but is located at the basal calcareous complex level, characterized by karst processes. The spring discharge feedback in this situation is strongly fast, as a null delay and a maximum discharge after about 20 days are displayed (ANGELINI, 1997).

Figure 11 shows the daily spring discharge data autocorrelogram for the Cavalli intake, monitored from 1998 to 2004. The autocorrelation function (ACF; FRASCA, 2009) consists in the correlation, within a set of data, among the value referring to a given time and

correlazione ad ogni successivo ritardo, qui viene sviluppata la funzione di autocorrelazione (ACF, *Auto Correlation Function*; FRASCA, 2009) in cui il valore di portata di un certo periodo viene correlato con quello di periodi precedenti. L'autocorrelazione permette di stimare "l'effetto memoria" del processo di efflusso sorgivo che, secondo alcuni Autori (MANGIN, 1984; PADILLA & PULIDO-BOSCH, 1995), è sintomatico della capacità drenante dell'idrostruttura che alimenta la sorgente in esame. Il correlogramma rappresenta graficamente tale effetto e lo quantifica: quanto più la roccia è fratturata e/o carsificata, tanto minore risulta la persistenza di correlazione significativa della portata con i valori precedenti della stessa serie.

Nel caso della presa Cavalli il segnale tra il 1998 ed il 2004 manifesta una durata media di 79 giorni. Secondo uno schema proposto da MANGIN (1984), nei sistemi carsici l'effetto memoria ha una durata massima di 40 giorni, nei sistemi misti da 40 a 60 giorni. Ritardi maggiori indicano assenza di carsismo e possono essere dovuti, nel bacino di ricarica di M. Cambio, all'evidente presenza di sistemi di fratture e livelli a bassa permeabilità. Il risultato di Presa Cavalli, infatti, appare compatibile con la schematizzazione proposta da MANGIN (1984); al contrario, i risultati dello studio di ANGELINI (1997) sulla sorgente Scirca, pur riferita ad un sistema carsico, rivelano un effetto memoria paragonabile a quello di Presa Cavalli. Il suddetto Autore, facendo riferimento ad una situazione analoga relativa a sorgenti carsiche in Bulgaria (PULIDO-BOSCH *et alii*, 1995), spiega tale circostanza con la presenza di un flusso di base molto consistente non direttamente riferibile alla presenza di percorsi carsici.

L'analisi delle serie temporali fin qui trattata si limita al solo dominio del tempo. I risultati dell'analisi nel dominio della frequenza non saranno discussi, in quanto non aggiungono ulteriori importanti elementi alla caratterizzazione della struttura idrogeologica di M. Cambio.

A conclusione del presente studio viene fornito un breve cenno descrittivo delle curve di scarico di Presa Cavalli e Porcini 1. Utilizzando le serie storiche disponibili sono state determinate le curve di esaurimento relative ai 6 anni di osservazione della portata di Presa Cavalli; essendo queste tra loro molto simili, viene riportata in figura 12 la curva ritenuta più rappresentativa, appartenente al ciclo idrologi-

those of previous periods. The ACF allows the estimation of the "memory" effect of the spring discharge process, which may be expressive of the draining attitude of the hydrostructure feeding the springs (MANGIN, 1984; PADILLA & PULIDO-BOSCH, 1995). The correlogram represents this effect also regarding its quantitative aspects: higher is the degree of fessuration and karst processes of the rocks, smaller is the persistence of a striking correlation of the spring discharge with previous values of the same series.

As regards the Cavalli intake, during 1998-2004, 79 days of average feedback permanence were estimated. Following MANGIN (1984) criterion, karst systems have a "memory" effect lasting by 40 days, "mixed" systems are characterized by lasting effects from 40 to 60 days and higher extent indicate no occurrence of karst processes. The feedback time of the Cavalli intake (79 days) is in agreement with the MANGIN (1984) criterion, while, on the contrary, the results of ANGELINI (1997) regarding the Scirca spring, clearly linked to a karst system, estimate a "memory" effect similar to that of Cavalli spring. The last Author explains the high "memory" effect of the karst Scirca spring assuming for it a huge base flow rate, not directly related to karst pathways, according to a similar situation of karst springs in Bulgaria (PULIDO-BOSCH *et alii*, 1995).

The time series analyses so far proposed in this paper regard the only time domain. The results obtained by the analyses in the frequency domain will not be here discussed, since they do not add further main elements to the characterization of the Mt. Cambio hydrostructure.

Finally, the available time series were used to determine the recession curves for discharge of 6 hydrological cycles from the Cavalli intake; in figure 12, only the curve regarding the 1999 is shown, since it was considered the most representative among the others, which are mutually very similar. Figure 13 instead shows the recession curves from the Porcini 1 intake regarding 1953 and 2000 hydrological cycles. The recession process model for the two springs can be represented using MAILLET'S (1905) exponential function. The recession coefficients of the two springs differ greatly (Cavalli intake mean

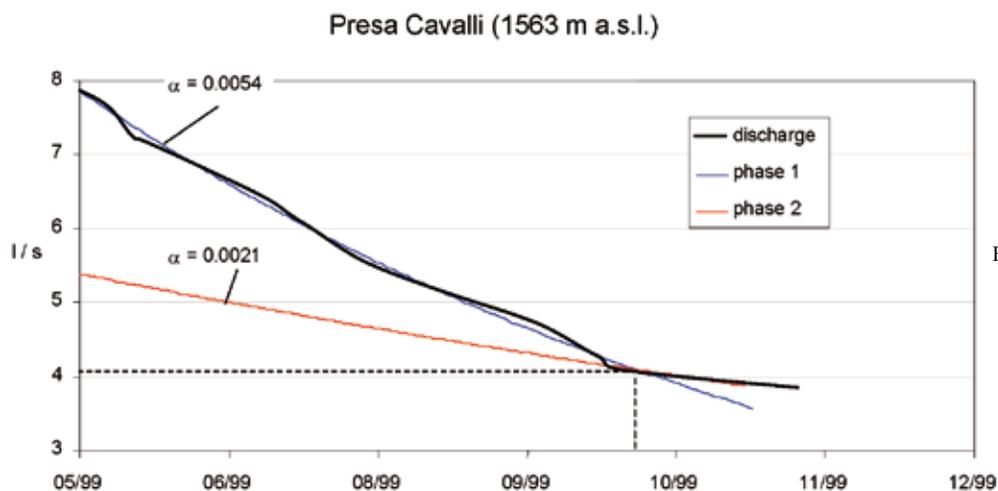
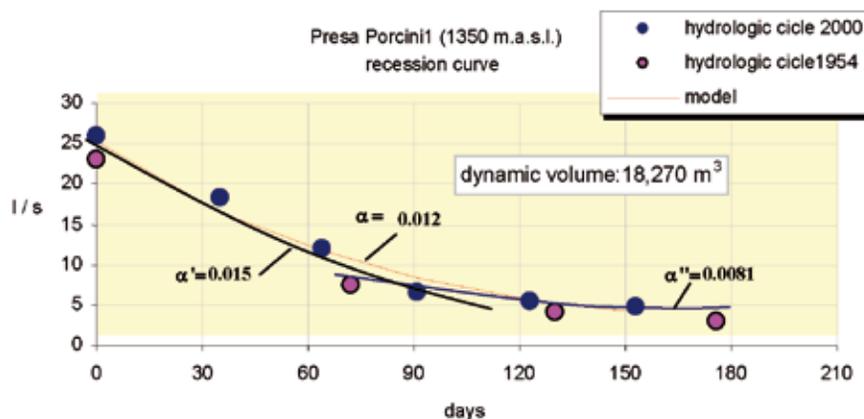


Fig. 12 - Curva di esaurimento della Presa Cavalli e coefficienti di esaurimento delle fasi del processo
- Cavalli intake: depletion's coefficients and regression curve

Fig. 13 - Curva di esaurimento della Presa Porcini 1 e coefficienti di esaurimento delle fasi del processo
 - Porcini 1 intake: depletion's coefficients and regression curve



co del 1999. In figura 13 vengono rappresentate le curve di esaurimento di Presa Porcini 1 riguardanti i cicli idrologici del 1953 e del 2000. Il modello di rappresentazione del processo di esaurimento delle due sorgenti è definito in modo soddisfacente dalla funzione esponenziale di MAILLET (1905). I coefficienti di esaurimento differiscono di molto (Presa Cavalli è in media 0,0048, Presa Porcini 1 è in media 0,0117), come illustrato nei due grafici, e sono indicativi di un tasso di svuotamento di Presa Porcini 1 più elevato di quello di Presa Cavalli.

CONCLUSIONI

Le litologie affioranti nell'area dell'idrostruttura di M. Cambio costituiscono una successione sedimentaria stratificata calcareo-silico-marnosa ed a luoghi argillosa, formata dai termini della successione umbro-marchigiano-sabina compresi tra il Calcare Massiccio e la Maiolica. Tale successione è ricoperta da depositi incoerenti di varia origine e granulometria del Quaternario e, dal punto di vista strutturale, ha un assetto sinforme, con ondulazioni, pieghe minori e faglie distensive (rigetti nell'ordine delle decine di metri), e faglie normali, di maggiore importanza, che delimitano l'idrostruttura. Le singole sorgenti in quota sono alimentate da varie aree di ricarica di estensione modesta, idraulicamente indipendenti, sostenute dai termini più marnosi della successione.

L'idrostruttura di Monte Cambio, ospitata principalmente nel complesso idrogeologico calcareo superiore, è limitata a NE da una linea tettonica diretta subverticale e a S e a W dall'acquicludo basale, presente, ma non affiorante, anche nell'estremità NW. L'area sottesa da tali limiti misura circa 2.2 km². Attraverso la suddetta linea tettonica è possibile avvengano processi di *drenance* dall'idrostruttura in studio verso l'aquifero basale, ospitato nel complesso calcareo basale.

E' stato effettuato un calcolo approssimativo di bilancio idrogeologico dell'idrostruttura di M. Cambio (area di ricarica circa 2,2 km²). Nel complesso, è stato stimato un eccesso di infiltrazione efficace compreso tra 600 e 750 mm/a, corrispondenti a 40-50 l/s di risorsa idrica, che probabilmente trova recapito nell'acquifero calcareo basale regionale e/o in altri sistemi acquiferi limitrofi.

Le sorgenti sospese di alta quota di M. Cambio sono interessate da un regime stagionale di ricarica della falda fortemente influenzato

value 0.0048; Porcini 1 intake mean value 0.117), as illustrated in the two graphs, showing that the emptying rate for Porcini 1 intake is much greater than that for the Cavalli intake.

CONCLUSIONS

The outcropping lithotypes of the Mt. Cambio hydrostructure area illustrate a stratified calcareous-siliceous-marly sedimentary succession with argillaceous zones, composed of facies of the Sabina succession between the Calcare Massiccio and the Maiolica Formations. This succession is covered with incoherent Quaternary deposits of various origin and sizes. The structure shows a synform feature, with associated undulations, minor folds and normal faults (displacements in the tens of metres) and more important normal faults that delimit the hydrostructure. The individual high-altitude springs are fed by a number of hydraulically independent recharge areas, each of modest area, supported by the more marly formations of the succession.

The Mt. Cambio hydrostructure, mainly hosted in the Upper calcareous hydrogeological complex, is bordered at NE by a sub-vertical normal tectonic line and at S and W from the basal aquicludo; this latter occurs, but does not outcrop, also to the NW edge of the structure. The total surface of this structure has been evaluated in 2.2 km². The cited normal tectonic line is concerned by *drenance* processes from the Mt. Cambio hydrostructure towards the basal aquifer, hosted in the Basal calcareous complex.

An approximate calculation of the hydrological budget was carried out for the Mt. Cambio hydrostructure (recharge area about 2.2 km²). The calculations indicate an excess of effective infiltration of between 600-750 mm/yr, corresponding to approximately 40-50 l/s of groundwater resource, which is probably directed to the regional basal calcareous aquifer and/or to other adjacent aquifers.

The high-altitude perched springs of Mt. Cambio hydrostructure

dal processo di accumulo e di fusione della neve. Tuttavia, in termini quantitativi, rispetto alla neve è la pioggia ad avere un ruolo preminente nell'alimentazione dell'acquifero, con il 74% circa delle precipitazioni totali, peraltro distribuito su buona parte dell'anno.

Le serie temporali di temperatura e di altezza di pioggia hanno evidenziato una progressiva variazione delle medie annuali nel corso degli ultimi 50 anni. In particolare la temperatura estiva ha subito un incremento medio di 2,5°C. Ciò ha provocato il progressivo aumento dell'evapotraspirazione potenziale che, nel ciclo annuale, è pari a circa il 9% (Fig. 6). Le piogge presentano un *trend*, decrescente, meno marcato del *trend* di temperatura. Si stima che dagli anni '50 ad oggi, tra incremento dell'evapotraspirazione e riduzione delle precipitazioni piovose, l'area di ricarica delle sorgenti di M. Cambio abbia perso in media circa il 5% di contributo delle piogge. Osservando le serie temporali disponibili delle portate, si evince che tutto ciò non abbia inciso sui minimi storici di portata (e sul flusso di base) delle tre maggiori sorgenti.

Dall'esame comparativo tra le serie temporali delle emergenze alimentate dalla falda sospesa di M. Cambio con quelle di una sorgente alimentata da falde più profonde appartenenti ad un acquifero distinto dalla struttura di M. Cambio (sorgente S. Angelo), si evidenzia uno sfasamento temporale di circa un mese nel picco di risposta agli *input* pluviometrici a causa del differente sviluppo dei circuiti sotterranei.

I risultati dell'analisi di correlazione incrociata tra apporti meteorici e portata di Presa dei Cavalli e di autocorrelazione della portata hanno fornito un quadro complessivo tipico di un acquifero dotato di elevata capacità di regolazione e di permeabilità secondaria piuttosto bassa in assenza di carsismo. Peraltro, il Calcere Massiccio, l'unica formazione della successione in cui può impostarsi del carsismo significativo, alla luce dei risultati del rilevamento geologico è risultata marginale nell'ambito della idrostruttura di M. Cambio. Il suddetto quadro interpretativo si ritiene ragionevolmente estendibile ad analoghe situazioni geologico-strutturali ed idrogeologiche presenti nel versante occidentale del M. Terminillo ed in altri rilievi ai margini della valle del fiume Velino.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'anonimo *referee* incaricato della revisione del lavoro per i preziosi e puntuali suggerimenti proposti.

OPERE CITATE/REFERENCES

- ANGELINI P. (1997) - *Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in Central Italy*. Hydrol. Sci. Jour., **42**: 3, 425-438.
- ANNALI IDROLOGICI (1955-1999) - *Parte prima e parte seconda (sezioni di Roma)*. Servizio Idrografico Ministero dei Lavori Pubblici/Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, Roma.
- BIGI S., CALAMITA F., CENTAMORE E., DEIANA G., RIDOLFI M. & SALVUCCI R. (1991) - *Assetto strutturale e cronologia della deformazione della "zona d'incontro" tra le aree umbro-marchigiana e laziale-abruzzese (Marche meridionali e Lazio-Abruzzo settentrionali)*. Studi Geologici Camerti vol. spec. **1991/2**: "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 11 Civitavecchia-Vasto", 21-26.
- BONI C.F., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**: 991-1012.
- BONI C., CAPELLI G. & PETITTA M. (1995) - *Carta idrogeologica dell'alta e media valle del Fiume Velino*. Univ. di Roma "La Sapienza" - Univ. di "Roma Tre" - Comunità Montana del Velino, Roma.
- CAPOTORI F., CENTAMORE E., CHIOCCINI M., CIVITELLI G., CORDA L., MANCINELLI A., MARIOTTI G., ROMANO A. & SALVUCCI R. (1991) - *Dati preliminari geologico-stratigrafici sull'Unità*

display a seasonal recharge rate strongly influenced by the snow accumulation and melting processes. However, in quantitative terms, rainfall plays the dominant role in feeding the aquifer, providing about the 74% of the total precipitation over the hydrological year.

The temperature and rainfall time series have evidenced a progressive variation of the annual mean values during the last 50 years. In particular, the summer temperatures had a mean increase of 2.5°C, inducing a progressive increasing of about 9% for the potential evapotranspiration referred to the annual cycle (Fig. 6). Rainfall shows a comparatively less striking decreasing trend. From the 1950s to nowadays, a mean loss of about 5% of atmospheric precipitation, considering both the evapotranspiration increment and the rainfall reduction, has been calculated in the Mt. Cambio hydrostructure recharge area. The spring discharge time series however indicate that the minimum flow values (and the base flow) of the three major spring of the Mt. Cambio area have not suffered any reduction with time.

Comparing the time series of the springs of the suspended aquifer of M. Cambio and that of the basal spring of S. Angelo, located in a different but neighbouring aquifer respect to that of the Mt. Cambio hydrostructure, it is evident that the former basal spring exhibit a feedback time delay of about one month from the precipitation events, depending from different underground pathways.

The results obtained from both the cross-correlation analysis, for local precipitation and Cavalli intake spring discharge, and the autocorrelation of spring discharge allow the reconstruction of a general interpretative picture defining an aquifer having a strong regulation attitude and relatively low secondary hydraulic permeability, with no evidence of karst processes. According to that, the Calcere Massiccio, the only formation in the local succession in which karst processes may occur, on the basis of the geological evidences is scarcely represented within the Mt. Cambio hydrostructure. The former general picture is likely suitable for similar geological-structural and hydrogeological situations occurring in other sectors of the Mt. Terminillo and in other reliefs along the Velino River valley margins.

ACKNOWLEDGEMENT

The anonymous referee who worked on the revision of this paper is sincerely thanked for the useful and accurate suggestions.

**HYDROGEOLOGICAL FEATURES OF HIGH-ALTITUDE SPRINGS OF THE CAMBIO MT. HYDROSTRUCTURE (RIETI, ITALY)
AND LOCAL METEO-CLIMATIC EFFECTS ON THEIR DISCHARGE PROCESSES**

- di Monte Giano e Monte Gabbia*. Studi Geologici Camerti, vol. spec. **1991/2**: “Studi preliminari all’acquisizione dati del profilo CROP 11 Civitavecchia-Vasto”, 119-123.
- CASTELLARIN A., COLACICCHI R., PRATURLON A. (1978) - *Fasi distensive, trascorrenze e sovrascorrimenti lungo la “Linea Ancona-Anzio”, dal Lias medio al Pliocene*. Geologica Rom., **17**: 161-189.
- CENTAMORE E., CIVITELLI G., CORDA L., MARIOTTI G., ROMANO A., CAPOTORTI F. & SALVUCCI R. (1991) - *Carta geologica dell’area di M. Giano-M. Gabbia-Gole del Velino (Alta valle del F. Velino, Lazio nord-orientale)* - Scala 1:25.000. ESSE GI ESSE, Roma.
- DAGUM E. B., (2002) - *Analisi delle serie storiche. Modellistica, previsione, scomposizione*. 302 pp., Spinger, Milano.
- DALLAN NARDI L., ELTER P. & NARDI R. (1971) - *Considerazioni sull’arco dell’Appennino settentrionale e sulla “linea” Ancona-Anzio*. Boll. Soc. Geol. It., **90**: 203-211.
- DEIANA G., PASQUALINI L., SALVUCCI R., STROPPA P. & TONDI E. (1995) - *Il sistema dei sovrascorrimenti dei Monti Reatini: analisi geometrica e cinematica*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale **1995/2**: 199-206.
- FRASCA S. (2009) - *Analisi dei segnali*. 270 pp., Dispense Dipartimento di Fisica Università di Roma “La Sapienza”, Roma.
- GERSTENGARBE F.W. & WERNER P. (1999) - *Estimation and end of recurrent events within a climate regime*. Climate Research, **11**: 97-107.
- GHISETTI F. & VEZZANI L. (1988) - *Rapporti strutturali tra il fronte del Gran Sasso ed il Flysch della Laga (Appennino centrale)*. Mem. Soc. Geol. It., **41**: 1171-1178.
- GIULIANO G. & SCIOTTI M. (1981) - *Schema idrogeologico del Bacino del Tevere*. Quad. Ist. Ric. Acque, **48**, 67 pp., Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma.
- MAILLET E. (1905) - *Essais d’hydraulique souterraine et fluviale*. 218 pp., Librairie Sci. Hermann, Paris.
- MANGIN A. (1984) - *Pour une meilleure connaissance des systemes hydrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale*. J. Hydrol., **67**: 25-43.
- OGNIBEN L. (1969) - *Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano*. Mem. Soc. Geol. It., **8**: 453-763.
- PADILLA A. & PULIDO-BOSCH A. (1995) - *Study of hydrograph of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis*. J. Hydrol., **168**: 73-89.
- PAROTTO M. & PRATURLON A. (1975) - *Geological summary of the Central Apennines*. In: L. OGNIBEN, M. PAROTTO AND A. PRATURLON (Eds.) - *Structural Model of Italy*. Quaderni della Ricerca Scientifica, **90**: 257-311.
- PIANA F. (1995) - *Caratteri geologico-strutturali della zona di M. Gabbia tra le Valli Velino ed Aterno (Appennino centrale, zona di raccordo tra i sovrascorrimenti del Gran Sasso e dei M. Sibillini)*. Studi Geologici Camerti, vol. spec. **1995/2**: “Atti del Convegno Geodinamica e tettonica attiva del sistema Tirreno-Appennino”, 375-385.
- PIERANTONI P.P., DEIANA G., ROMANO A., PALTRINIERI W., BORRACCINI F. & MAZZOLI S. (2005) - *Geometrie strutturali lungo la thrust zone del fronte montuoso umbro-marchigiano-sabino*. Boll. Soc. Geol. It., **124**: 395-411.
- PULIDO-BOSCH A., PADILLA A., DIMITROV D. & MACHKOVA M. (1995) - *The discharge variability of some karst spring in Bulgaria studied by time series analysis*. Hydrol. Sci. J., **40** (4) : 517-532.
- SEN P.K. (1968) - *Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau*. Journal of the American Statistical Association, **63**: 1379-1389.
- SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE (1995) - *Carta Idrogeologica d’Italia - 1:50.000. Guida al rilevamento e alla rappresentazione*. Quaderni SGN, serie III, n.5, IPZS.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1983) - *Guide to climatological practices*. WMO, 100 (2nd ed.), 198 pp. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Received February 2010 - Accepted October 2010